

ผลของการตัดแปรพื้นผิวเมล็ดสตาร์ชมันสำปะหลังต่อการเกิดเดกซ์ทริน
ด้านทานการย่อย

นางสาวเกวลี พร้อมพิพัฒน์พร



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2557

**EFFECT OF MODIFIED CASSAVA STARCH GRANULE
SURFACE ON RESISTANT DEXTRIN FORMATION**

Kewalee Prompiputtanaporn



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Science in Food Technology**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2014

ผลของการตัดแปรพื้นผิวเม็ดสตาร์ชมันสำปะหลังต่อการเกิดเดกซ์ทริน
ด้านทานการย่อย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.มานิชญ์ สุธีพัฒนานนท์)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.สุนันทา ทองทา)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(รศ. ดร.กล้าณรงค์ ศรีรอด)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรมการ

(ผศ. ดร.สุเวทย์ นิงสานนท์)

คณบดีสำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร

เกวลี พร้อมพิพัฒน์พร : การดัดแปรพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชมันสำปะหลังต่อการเกิด

เดกซ์ทรินต้านทานการย่อย (EFFECT OF MODIFIED CASSAVA STARCH GRANULE SURFACE ON RESISTANT DEXTRIN FORMATION) อาจารย์ที่ปรึกษา :

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภันtha ทองทา, 95 หน้า.

ผลของการดัดแปรพื้นผิวเม็ดสตาร์ช ด้วยวิธีการย่อยด้วยเอนไซม์แบบเดี่ยว และแบบผสมย่อยด้วยกรด และย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball-mill ได้ศึกษาก่อนการนำไปเตรียมเดกซ์ทรินต้านทานการย่อย (Resistant Dextrin) เมื่อย่อยสตาร์ชด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเพียงอย่างเดียว หรือย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลไกลูโคซิเดสเพียงอย่างเดียว ย่อยด้วยเอนไซม์ผสมระหว่างเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลไกลูโคซิเดส และย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริก ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่าระดับการย่อยสตาร์ชด้วยเอนไซม์มีค่าต่ำกว่าการย่อยด้วยกรด

ลักษณะรูปร่างและพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับวิธีการดัดแปร โดยพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์จะมีรูพรุน และช่องเปิดเกิดขึ้นบนพื้นผิว แต่รูปร่างและขนาดของเม็ดสตาร์ชไม่แตกต่างจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ ส่วนพื้นผิวของสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด มีความขรุขระตลอดทั้งพื้นผิว เม็ดสตาร์ชบางส่วนมีขนาดเล็กลง บางส่วนถูกหลอมเข้ามอดัดกันทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้น และยังพบว่าปริมาณผลึกมีค่าสูงที่สุด (34.88%) สำหรับสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball-mill พื้นผิวที่เกิดขึ้นมีความขรุขระและสูญเสียความเป็นเกรนูลไป กลายเป็นเศษชิ้นส่วนเล็ก ๆ และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยลดลงเหลือเพียง 9.96 ไมครอน เมื่อตรวจสอบพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรของรูพรุน และเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุน ด้วยวิธีการดูดซับแก๊สไนโตรเจน พบว่าสตาร์ชหลังดัดแปรมีพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรของรูพรุน และเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนเพิ่มขึ้น โดยตัวอย่างสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball-mill มีการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรและเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนมากที่สุด คือ $3.58 \text{ m}^2/\text{g}$ $0.82 \text{ cm}^3/\text{g}$ และ 47.11 nm ตามลำดับ

การศึกษาผลของการเตรียมเดกซ์ทรินต้านทานการย่อยจากสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรพื้นผิวด้วยวิธีการต่าง ๆ พบว่า ลักษณะรูปร่างและพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชของเดกซ์ทรินต้านทานไม่มีการเปลี่ยนแปลงไป แต่ปริมาณผลึกมีค่าลดลง ค่าความขาวและความสามารถในการละลายน้ำของเดกซ์ทรินต้านทานการย่อยที่เตรียมจากสตาร์ชที่ดัดแปรพื้นผิวโดยใช้เอนไซม์และกรด มีค่าต่ำกว่าเดกซ์ทรินต้านทานการย่อยที่เตรียมจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ แต่ปริมาณใยอาหารมีค่าสูงกว่า โดยเดกซ์ทรินต้านทานที่เตรียมจากสตาร์ชที่ถูกดัดแปรพื้นผิวด้วยเอนไซม์อะมิโลไกลูโคซิเดสมีปริมาณใยอาหารสูงที่สุด (64.68%) ส่วนเดกซ์ทรินต้านทานการย่อยที่เตรียมจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบมีค่า

45.10% สำหรับเด็กซ์ทรินที่เตรียมจากสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball-mill สามารถละลายน้ำได้น้อย (23.40%) และมีปริมาณใยอาหารต่ำที่สุด (12.30%)



KEWALEE PROMPIPUTTANAPORN : EFFECT OF MODIFIED
CASSAVA STARCH GRANULE SURFACE ON RESISTANT DEXTRIN
FORMATION. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. SUNANTA TONGTA,
Ph.D., 95 PP.

MODIFIED STARCH SURFACE/ENZYMATIC HYDROLYSIS/ACID
HYDROLYSIS/BALL MILL/RESISTANT DEXTRIN

The effects of modified surface of cassava starch granules by enzymatic treatment, single or mixed enzymes, acid hydrolysis and acid hydrolysis followed by ball-milling prior to resistant dextrin preparation were studied. When starch was hydrolyzed with a single enzyme, α -amylase or amyloglucosidase, mixed enzymes of α -amylase and amyloglucosidase and hydrochloric acid at 55°C for 6 h, the degree of enzymatic hydrolysis was lower than that of acid hydrolysis.

Morphology and surface of starch granules were different, depending on the modification methods. The surface of starch granules after enzymatic hydrolysis showed voids and cavities. However, the shape and size of starch granules were not different from those of raw starch granules. Acid hydrolysis induced surface roughness throughout the granules. Some granules were smaller or fused together into larger ones. The relative crystallinity of acid hydrolyzed starch granules was highest at 34.88%. For the acid treatment followed by ball-milling, surface of starch granules clearly showed roughness. The granular structure disappeared and became smaller with an average diameter of 9.96 micron. The specific surface area, volume of pores and the average diameter of their pores were determined with nitrogen gas adsorption.

The surface of modified starch granules exhibited an increase in their specific surface area, volume and average diameter of their pores. The acid hydrolysis followed by ball-milled sample showed the highest specific surface area, pore volume and average diameter at 3.58 m²/g, 0.82 cm³/g, and 47.11 nm, respectively.

The effect of resistant dextrin prepared from starches modified with different methods was studied. The starch morphology and surface of resistant dextrin were altered but the relative crystallinity was decreased. The whiteness and water solubility of resistant dextrin prepared from starch modified surface using enzymes and acid hydrolyzed starch were lower but the total dietary fiber content was higher than resistant dextrin prepared from native cassava starch. The resistant dextrin from modified starch granule surface with amyloglucosidase contained the highest total dietary fiber (64.68%) as compared with resistant dextrin prepared from native cassava starch (45.10%). The resistant dextrin prepared from acid hydrolyzed starch followed by ball-milling was less water soluble (23.40%) and showed the lowest total dietary fiber content (12.30%).

School of Food Technology

Academic Year 2014

Student's Signature_____

Advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุนันทา ทองทา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้ความรู้ คำแนะนำ คำสั่งสอน ปรีกษา ช่วยแก้ปัญหา สนับสนุนและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยชี้แนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณคณาจารย์สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร ที่ให้ความรู้ในด้านวิชาการตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่นักวิทยาศาสตร์ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี อาคารเครื่องมือ 3, 6 และ 10 ทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในด้านอุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ ด้วยดีตลอดการดำเนินการวิจัย

ขอบคุณพี่ เพื่อน และน้องบัณฑิตศึกษาสาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทุกท่านที่คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำ ความช่วยเหลือ ร่วมทุกข์ ร่วมสุข และให้กำลังใจมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา คุณปู่ คุณย่า และคุณยาย ที่เป็นแรงผลักดันให้การสนับสนุนการศึกษา และคอยให้กำลังใจมาโดยตลอด รวมถึงญาติพี่น้องทุก ๆ คนที่เป็นกำลังใจจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

เกวลี พร้อมพิพัฒน์พร

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ณ
สารบัญรูปภาพ	ญ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.....	4
1.4 ขอบเขตงานวิจัย	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
2 ปฏิสัมพันธ์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 อนุกรมวิธานของมันสำปะหลัง.....	5
2.2 สตาร์ช.....	6
2.2.1 โครงสร้างของสตาร์ช	6
2.2.2 ลักษณะรูปทรงของเม็ดสตาร์ช.....	9
2.3 สตาร์ชดัดแปรพื้นผิว.....	10
2.3.1 การดัดแปรพื้นผิวสตาร์ชด้วยกรด	11
2.3.2 การดัดแปรพื้นผิวสตาร์ชด้วยเอนไซม์	12
2.3.3 การดัดแปรพื้นผิวสตาร์ชด้วย Ball-mill	14
2.4 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวและความพรุน	17
2.5 เดกซ์ทรินต้านทานการย่อย (Resistant Dextrin).....	21

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3	วัตถุดิบและวิธีการทดลอง.....	31
3.1	วัตถุดิบ	31
3.2	การดัดแปรพื้นผิวสตาร์ช.....	31
3.2.1	การดัดแปรพื้นผิวสตาร์ชโดยการใช้น้ำมัน.....	31
3.2.2	การดัดแปรพื้นผิวสตาร์ช โดยการใช้กรด.....	32
3.2.3	การดัดแปรพื้นผิวสตาร์ชโดยการใช้กรดแล้วบดด้วย Ball-mill.....	32
3.3	การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ.....	32
3.3.1	การวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างและพื้นผิวของสตาร์ชก่อนและหลังดัดแปรพื้นผิว.....	32
3.3.2	การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางผลึก ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD).....	32
3.3.3	การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคเฉลี่ย.....	33
3.3.4	การวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุนเฉลี่ย	33
3.3.5	สีของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบและสตาร์ชดัดแปรพื้นผิว	33
3.3.6	ค่าสมมูลเดกซ์โตรส Dextrose equivalent (DE).....	34
3.4	การเตรียมเดกซ์ทรินต้านทานการย่อย (Resistant Dextrin)	34
3.5	การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของเดกซ์ทรินต้านทานการย่อย	34
3.5.1	ลักษณะรูปร่างและพื้นผิวของเดกซ์ทรินต้านทานการย่อย	34
3.5.2	ลักษณะโครงสร้างและปริมาณผลึกของเดกซ์ทรินต้านทานการย่อย	35
3.5.3	สีของเดกซ์ทรินต้านทานการย่อย.....	35
3.5.4	ค่าสมมูลเดกซ์โตรส Dextrose equivalent (DE).....	35
3.5.5	การวิเคราะห์ความสามารถในการละลายน้ำ	35
3.5.6	การวิเคราะห์ปริมาณใยอาหารทั้งหมด (Total Dietary Fiber; TDF).....	35
3.6	การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ผลทางสถิติ.....	39
4	ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย	40
4.1	การย่อยสตาร์ชด้วยไขมันหรือกรด.....	40

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1.1 การย่อยสลายด้วยเอนไซม์แบบเดี่ยวและแบบผสม	40
4.1.2 การย่อยสลายด้วยกรด.....	41
4.2 ลักษณะรูปร่างและพื้นผิวของสตาร์ชก่อนและหลังดัดแปรพื้นผิว	42
4.3 ลักษณะโครงสร้างและปริมาณผลึกของสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลัง การดัดแปรพื้นผิว	53
4.4 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการดัดแปรพื้นผิว	56
4.5 ผลของขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุน ของสตาร์ช ดัดแปรพื้นผิว	58
4.5.1 ลักษณะการดูดซับ และการคายซับของแก๊สไนโตรเจนบนพื้นผิวของ สตาร์ช.....	58
4.5.2 ปริมาณของพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรของรูพรุน และขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุน	59
4.5.3 การกระจายตัวของขนาดรูพรุนของสตาร์ชก่อนและหลังการดัดแปรพื้นผิว	60
4.6 สีของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบและสตาร์ชดัดแปรพื้นผิว	62
4.7 ค่าสมมูลเดกซ์โทรส (Dextrose Equivalent; DE) ของสตาร์ชดัดแปรพื้นผิว	62
4.8 ผลของการเตรียมเดกซ์ทรินต้านทานการย่อย (Resistant Dextrin) จากสตาร์ช ดัดแปรพื้นผิวต่อคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ	63
4.8.1 ลักษณะรูปร่างและพื้นผิวของเดกซ์ทรินต้านทานการย่อย	64
4.8.2 ลักษณะโครงสร้างและปริมาณผลึกของเดกซ์ทรินต้านทานการย่อย	66
4.8.3 สีของเดกซ์ทรินต้านทานการย่อย	69
4.8.4 ค่าสมมูลเดกซ์โทรส Dextrose equivalent (DE) ของเดกซ์ทรินต้านทาน การย่อย	70
4.8.5 การละลายน้ำของเดกซ์ทรินต้านทานการย่อย	72
4.8.6 ปริมาณใยอาหารของเดกซ์ทรินต้านทานการย่อย	73
5 สรุปผลการศึกษา.....	77

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รายการอ้างอิง	78
ภาคผนวก	89
ประวัติผู้เขียน	95



สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

4.1	ปริมาณความเป็นผลึกของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (Native starch); สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสร่วมกับเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA + AMG) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด (AS) และสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดและบดด้วย ball-mill (ASBM).....	56
4.2	การกระจายตัวของขนาดอนุภาคสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (Native starch) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสร่วมกับเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA + AMG) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด (AS) และสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball-mill (ASBM)	56
4.3	ปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรของรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (Native starch) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสร่วมกับเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA + AMG) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด (AS) และสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball-mill (ASBM)	59
4.4	สีของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (Native starch) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสร่วมกับเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA + AMG) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด (AS) และสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball-mill (ASBM).....	62
4.5	ค่าสมมูลเด็กซ์โตรสของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (Native starch) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสร่วมกับเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA + AMG) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด (AS) และสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball-mill (ASBM).....	63

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่

หน้า

- 4.6 ปริมาณผลึกของเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย หลังกระบวนการเดกซ์ทรินในเซชันของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (Native starch dextrin) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AA + AMG) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด (AS) และสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดและบดด้วย ball-mill (ASBM) 67
- 4.7 ค่าความขาวของเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยที่ผลิตจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (Native starch dextrin) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AA + AMG) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด (AS) และสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball-mill (ASBM)..... 70
- 4.8 ค่าสมมูลเดกซ์โทรสของเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยที่ผลิตจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (Native starch dextrin) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AA + AMG) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด (AS) และสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball-mill (ASBM) 71
- 4.9 ความสามารถในการละลายน้ำของเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยที่ผลิตจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (Native starch dextrin) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AA + AMG) สตาร์ชที่ย่อยด้วย (AS) และสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball-mill (ASBM)..... 72

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่

หน้า

4.10 ปริมาณใยอาหารที่ละลายน้ำได้มวลโมเลกุลสูง (HMWDF) มวลโมเลกุลต่ำ (LMWDF) และปริมาณใยอาหารทั้งหมด (TDF) ของเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยที่ผลิตจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (Native starch dextrin) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AA + AMG) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด (AS) และสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball-mill (ASBM)	74
--	----



สารบัญรูปภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	ภาพจำลองการจับตัวของอะมิโลสกับสารประกอบอินทรีย์.....7
2.2	ลักษณะโครงสร้างอะมิโลเพคตินที่ประกอบด้วยสาย A B C และหมู่รีดิวซิง.....7
2.3	แผนภาพแสดงการจัดเรียงโครงสร้างของสตาร์ชจากถั่ว โดย a) แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของเม็ดสตาร์ชที่ถูกย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 2 วัน b) แผนภาพอธิบายการเจริญในลักษณะวงแหวน และ c) แสดงการกระจายของสายโซ่.....8
2.4	รูปแบบการหักเหรังสีเอ็กซ์เรย์ (a) และลักษณะการจัดเรียงของผลึกแบบ A และ B(b)9
2.5	การย่อยสลายสตาร์ชด้วย amylolytic enzymes..... 13
2.6	แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของตัวอย่างและลูกบอลภายในหม้ออบด.....15
2.7	กลไกการแตกของอนุภาค16
2.8	แผนภาพตัดขวางลักษณะของรูพรุนที่เป็นของแข็ง18
2.9	ชนิดของไอโซเทิร์มการดูดซับแก๊สที่สถานะสมดุล.....20
2.10	กลไกการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุลที่เป็นเส้นตรงของแป้งไปเป็นโมเลกุลที่มีลักษณะเป็นกึ่งก้านในระหว่างการให้ความร้อนของกระบวนการเดกซ์ทรีไนเซชัน25
2.11	การเปลี่ยนแปลงของโมเลกุลสตาร์ชในระหว่างกระบวนการเดกซ์ทรีไนเซชัน (A) และแสดงโมเดลของการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของคลัสเตอร์ของสตาร์ชและบางส่วนของบริเวณผลึกของสตาร์ชดิบ และสตาร์ชหลังผ่านกระบวนการเดกซ์ทรีไนเซชันเป็นเวลา 0.5 และ 4 ชั่วโมง (B)26
3.1	แผนภาพหลักการการวิเคราะห์ปริมาณใยอาหารตามวิธีของ AOAC 2011.25).....38
4.1	ปริมาณการย่อยของสตาร์ชด้วยเอนไซม์แบบเดี่ยว คือ ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส เพียงอย่างเดียว (AA) และย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเพียงอย่างเดียว (AMG) แบบผสม คือย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AA + AMG) และย่อยด้วยกรด (AS).....41

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

ภาพที่

หน้า

- 4.2 ลักษณะเมล็ดสตาร์ชของตัวอย่างสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการตัดแปรด้วยวิธีการต่าง ๆ ที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 1,000 (1) และ 6,000 (2) เท่า: A) สตาร์ชมันสำปะหลังดิบ; B) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง; C) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง; D) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง; E) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง; F) สตาร์ชที่ย่อยด้วย เอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง; G) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง; H) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง; I) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 6 ชั่วโมง และ J) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 6 ชั่วโมงแล้วบดด้วย ball-mill 44
- 4.3 ลักษณะเมล็ดสตาร์ชของตัวอย่างสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการตัดแปรด้วยวิธี การต่าง ๆ ที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 30,000 เท่า: A) สตาร์ชมันสำปะหลังดิบ; B) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง; C) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง; D) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง; E) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง; F) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง; G) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง; H) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง; I) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 6 ชั่วโมง และ J) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วบดด้วย ball-mill 49
- 4.4 ลักษณะโครงสร้างผลึกของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (Native Starch); สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA); สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG); สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AA + AMG); สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด (AS); และสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball-mill (ASBM) 55

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

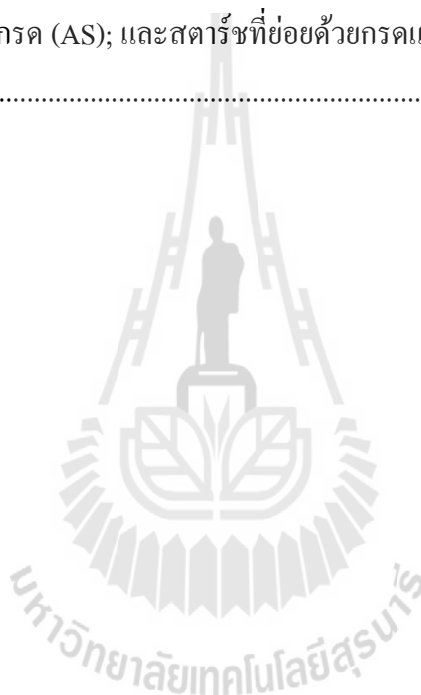
ภาพที่	หน้า
4.5	ไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption) และการคายซับ (Desorption) แก๊สไนโตรเจนของตัวอย่างสตาร์ชมันสำปะหลัง และ A แสดงจุดเปลี่ยนของกราฟเมื่อการดูดซับแบบชั้นเดียวเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์.....58
4.6	การกระจายตัวตามขนาดของรูพรุนของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (Native starch) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกูโคซิเดส (AMG) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกูโคซิเดสร่วมกับเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA + AMG) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด (AS) และสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball-mill (ASBM)61
4.7	ลักษณะรูปร่างของเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยที่เตรียมจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ และสตาร์ชที่ดัดแปรด้วยวิธีต่าง ๆ ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 1,000 (1) และ 6,000 (2) เท่า: A) สตาร์ชมันสำปะหลังดิบ; B) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส; C) ที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกูโคซิเดส; D) สตาร์ชที่ย่อยด้วย เอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกูโคซิเดส; E) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด และ F) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดและบดด้วย ball-mill 64
4.8	ลักษณะโครงสร้างผลึกของเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยที่ผลิตจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (Native); สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA); สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกูโคซิเดส (AMG); สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกูโคซิเดส (AA + AMG); สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด (AS); และสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball-mill (ASBM) 68
ก.1	รูเดี่ยวขนาดใหญ่ นั้น ภายในมีความขรุขระ และรูที่เกิดขึ้นขยายลงไปสู่ส่วนกลางของเม็ดสตาร์ชที่เกิดจากการย่อยด้วยเอนไซม์ผสม90
ก.2	สตาร์ชมันสำปะหลังดิบบดด้วย ball-mill เป็นเวลา 1 ชั่วโมง90
ก.3	สตาร์ชมันสำปะหลังดิบบดด้วย ball-mill เป็นเวลา 2 ชั่วโมง91
ก.4	สตาร์ชมันสำปะหลังดิบบดด้วย ball-mill เป็นเวลา 3 ชั่วโมง91
ก.5	สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball-mill เป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....92
ก.6	สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball-mill เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....92
ก.7	สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball-mill เป็นเวลา 3 ชั่วโมง.....93

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

ภาพที่

หน้า

ก.8	ตัวอย่างกราฟ BET สำหรับคำนวณพื้นที่ผิวจำเพาะ	93
ก.9	ไอโซทอมการดูดซับในโตรเจนของสตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส (AA); สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG); สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสร่วมกับเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส (AA + AMG); สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด (AS); และสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดต่อด้วย ball-mill (ASBM)	94



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

มันสำปะหลังเป็นพืชที่สำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทย ปลูกง่าย ทนทานต่อสภาพดินฟ้าอากาศที่แปรปรวน สามารถเจริญเติบโตได้ในพื้นที่ ๆ ดินมีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ ผลตอบแทนต่อไร่สูง และมีต้นทุนการผลิตต่ำกว่าพืชชนิดอื่นหลายชนิด และเมื่อนำมาผลิตเป็นแป้งจะได้แป้งที่มีความบริสุทธิ์สูง นำไปใช้ในหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมน้ำมัน และอุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการดัดแปรแป้งมันสำปะหลังด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น วิธีทางเคมี ทางกายภาพ และทางชีวภาพ เป็นต้น เพื่อให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาวะการผลิตและคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ (กล้าณรงค์ และคณะ, 2543) นอกจากการดัดแปรแป้งให้เหมาะกับการใช้งานของแต่ละอุตสาหกรรมแล้ว ยังสามารถดัดแปรแป้งให้มีคุณสมบัติที่เป็นคุณประโยชน์ต่อสุขภาพได้อีกด้วย เช่น แป้งต้านทาน (resistant starch; RS) และเดกซ์ทรินต้านทานการย่อย (resistant dextrin or indigestible dextrin) ซึ่งผลิตภัณฑ์ทั้งสองชนิดนี้แสดงคุณสมบัติเหมือนกับใยอาหารที่ได้จากธรรมชาติ แต่เดกซ์ทรินต้านทานการย่อยสามารถละลายน้ำได้ดีกว่า (Lefranc-Millot et al., 2006)

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ได้มีการศึกษากระบวนการนำแป้งชนิดต่าง ๆ เพื่อเตรียม dextrin ที่ไม่ถูกย่อย (non-digestible dextrin or indigestible dextrin) ด้วยกระบวนการให้ความสูงแก่แป้งในสภาวะแห้ง หรือเรียกว่ากระบวนการ “Pyroconversion” ซึ่งแป้งที่ถูกดัดแปรเป็นเดกซ์ทรินด้วยวิธีนี้จะมีคุณสมบัติคล้ายกับ RS (Wang et al., 2001) ซึ่งแป้งที่ถูกดัดแปรโดยใช้สารเคมีและผ่านความร้อนแล้วโครงสร้างภายในมีการจัดเรียงตัวกันใหม่ จัดอยู่ใน RS ประเภทที่ 4 (resistant starch type 4; RS4) และยังมีคุณสมบัติที่สำคัญอีก คือ มีความหนืดต่ำและละลายน้ำได้ดี (Leszczynski, 2004) แต่จากรายงานเหล่านี้ พบว่าเดกซ์ทรินที่ผลิตได้จะมีสีเหลืองถึงสีน้ำตาลเข้มเมื่อสภาวะในการทำปฏิกิริยารุนแรงมากขึ้น (Laurentin et al., 2003; Kwon et al., 2005; Champechano et al., 2007)

ลักษณะทางโครงสร้างของเม็ดแป้งมีส่วนสำคัญในการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ จากการศึกษาของ Fannon et al. (1992) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) ศึกษาลักษณะทางสัณฐานของเม็ดแป้งข้าวโพด พบว่าบนพื้นผิวของเม็ดแป้งข้าวโพดจะมีรูพรุนปรากฏอยู่ ความเป็นรูพรุนของเม็ดแป้งมีบทบาทสำคัญในหลาย ๆ ปรากฏการณ์

เช่น การดูดซับน้ำ การนำความร้อน การแพร่ของน้ำ และยังมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติเชิงกลและลักษณะเนื้อสัมผัส (Rahman, 2001) แป้งที่มีรูพรุนจะถูกใช้เป็นตัวดูดซับสารระเหยพวกเปปไทด์ โปรตีน เอนไซม์ และจุลินทรีย์ (Forssell et al., 1999; Kobayashi, Miwa, and Suzuki, 1992; Myllarinen et al., 1999; Zeller, Saleeb, and Ludescher, 1999) แป้งแต่ละชนิดจะมีลักษณะของเม็ดแป้งแตกต่างกันไปตามต้นกำเนิดทางพฤกษศาสตร์ พืชหัวโดยทั่วไปจะมีเม็ดแป้งขนาดใหญ่และมีรูปร่างเป็นวงรีหรือทรงกลม ในขณะที่เม็ดแป้งจากธัญพืชส่วนใหญ่จะมีขนาดเล็กและมีหลายเหลี่ยม (Polyhedral) เม็ดแป้งจากพืชตระกูลถั่วจะมีลักษณะเหมือนกับไตหรือลักษณะรูปไข่ (Gallant et al., 1997) ขนาดของเม็ดแป้งจะมีลักษณะเฉพาะตัวขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิด และยังมีการกระจายตัวในช่วงกว้าง เม็ดแป้งมันสำปะหลังจะเป็นทรงกลมและมีปลายตัดด้านหนึ่ง (truncated)

จากการศึกษาลักษณะเม็ดแป้งข้าวโพดและแป้งมันสำปะหลังของ Uthumporn et al. (2010) ด้วยกล้อง SEM พบว่าเม็ดแป้งข้าวโพดมีรูพรุนบนผิวหน้าโดยธรรมชาติในขณะที่เม็ดแป้งมันสำปะหลังนั้นไม่ปรากฏรูพรุน ดังนั้น แป้งข้าวโพดจึงมีความไวต่อการทำปฏิกิริยาต่าง ๆ มากกว่าแป้งมันสำปะหลัง เนื่องจากสารเคมีสามารถแพร่ผ่านทางรูพรุนเข้าไปทำปฏิกิริยาภายในได้ดีกว่า และพื้นที่ในการทำปฏิกิริยายังมีมากกว่า แต่เมื่อนำแป้งทั้งสองไปย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (α -amylase) และเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (amylglucosidase) พบว่าแป้งทั้งสองมีความเป็นรูพรุนมากขึ้น สอดคล้องกับการศึกษาของ Chen et al. (2011) ซึ่งใช้เอนไซม์แอลฟาอะมิเลสและเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสย่อยแป้งมันสำปะหลังเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวให้มากขึ้น การทำให้แป้งมีรูพรุนเพื่อเพิ่มความสามารถและคุณสมบัติทางกายภาพต่าง ๆ นอกจากจะใช้เอนไซม์แล้วยังสามารถใช้สารเคมี เช่น กรด หรือ ใช้แรงทางกล เช่น การบด การโม่ ได้อีกด้วย

การใช้กรดในการย่อยแป้งมีการศึกษามาเป็นเวลานาน ซึ่งการย่อยแป้งด้วยกรดถูกใช้ในการดัดแปรเม็ดแป้ง และใช้ผลิตแป้งที่สามารถละลายน้ำได้ (Soluble starch) (Kainuma, 1971) การนำแป้งมาย่อยด้วยกรดซัลฟูริกจะได้ผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่า Nageli amyloextrin (Nageli, 1874) ซึ่งเม็ดแป้งจะมีขนาดเล็กและมีโครงสร้างกึ่งมากขึ้น ส่วนการย่อยแป้งด้วยกรดไฮโดรคลอริกจะได้ผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่า Lintnerized starch (Lintner, 1886) จากการศึกษาของ Jayakody and Hoover (2002) ได้ทำการศึกษาความไวของแป้งชนิดต่าง ๆ ต่อการย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริก 2.2 N เป็นเวลา 15 วัน พบว่าการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้าง รูปร่างและคุณสมบัติต่าง ๆ นั้นมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดของแป้ง แต่แป้งที่ถูกย่อยด้วยกรดจะมีขนาดและปริมาณอะมิโลสลดลง แต่จะมีความเป็นผลึกสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งดิบ

การใช้วิธีทางกลนั้นเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถใช้ทำให้เกิดลักษณะที่เป็นรูหรือเกิดการแตกของเม็ดแป้งเพื่อเพิ่มพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ได้ การทำเม็ดแป้งให้มีขนาดอนุภาคเล็กลงจากเดิมโดยใช้แรงทางกล เช่น การใช้เครื่อง Ball mill ซึ่งเป็นวิธีการบดโดยใช้ลูกบดที่เป็นเหล็ก

หรือเซรามิก เป็นต้น การใช้บอลล์ มิลล์ ถูกนำไปประยุกต์ใช้หลังจากการเตรียมแป้งโดยการย่อยด้วยกรดก่อน ซึ่งมีประสิทธิภาพในการทำลายโครงสร้างของแป้งได้มากขึ้น (Niemann and Whistler, 1992; Jane et al., 1992) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Sanguanpong et al. (2003) ได้ศึกษาการเตรียมและคุณสมบัติของโครงสร้างของแป้งมันสำปะหลังที่มีขนาดอนุภาคเล็ก โดยนำแป้งมันสำปะหลังมาย่อยด้วยกรดและเอนไซม์ก่อนนำไปบดด้วยเครื่อง ball mill อีกครั้ง ผลการศึกษาพบว่าเม็ดแป้งมีขนาดเล็กลงจากแป้งดิบเป็นอย่างมาก

ปัจจุบันผู้บริโภคหันมาดูแลสุขภาพกันเพิ่มขึ้น การรับประทานใยอาหารนั้นมีประโยชน์ต่อสุขภาพมากมาย เช่น ช่วยป้องกันอาการท้องผูก ลดระดับน้ำตาลในเลือด ป้องกันโรคมะเร็งและโรคหลอดเลือดหัวใจ ซึ่งแหล่งของใยอาหารที่สำคัญนั้นได้มาจากผักและธัญพืชเป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ ใยอาหารยังสามารถผลิตได้จากการนำแป้งมาดัดแปรโครงสร้างเพื่อให้มีคุณสมบัติเหมือนกับใยอาหารที่ได้จากผักและธัญพืชอีกด้วย โดยองค์การต่าง ๆ ในระดับนานาชาติ ได้ให้คำจำกัดความของใยอาหารว่า “เป็นคาร์โบไฮเดรตที่มีระดับการเชื่อมต่อของพอลิเมอร์มากกว่า 3 หน่วยขึ้นไปและไม่ถูกย่อยหรือถูกดูดซึมที่ลำไส้เล็ก” ซึ่งใยอาหารสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ ใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ และใยอาหารที่ละลายน้ำได้ สำหรับใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำและได้มาจากการดัดแปรแป้งนั้น ตัวอย่างเช่น แป้งด้านทาน เป็นต้น และใยอาหารที่ละลายน้ำได้และได้มาจากการดัดแปรแป้งนั้น ตัวอย่างเช่น เดกซ์ทรินด้านทานการย่อย หรือมอลโตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย (Resistant Maltodextrin) เป็นต้น ซึ่งกระบวนการผลิตนั้นจะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและการนำไปใช้งานของผู้ผลิตและผู้บริโภค

เดกซ์ทรินด้านทานการย่อยนั้น เป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสสายสั้น ที่ไม่มีรสหวานและมีความต้านทานต่อเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารของร่างกายมนุษย์ (Ohkuma et al., 1999) โดยโครงสร้างภายในจะจับกันด้วยพันธะ α -1, 2, -1, 3, -1, 6 และ β -glycosidic มากกว่าสาคาร์ชดิบที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตซึ่งมีโครงสร้างที่จับกันด้วยพันธะ α -1, 4 และ 1, 6 ซึ่งสามารถถูกย่อยได้ด้วยเอนไซม์ในร่างกายของมนุษย์ (Mana, 2003) ซึ่งเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยสามารถผลิตได้โดยใช้วิธี pyroconversion หรือเดกซ์ทรีไนเซชัน (dextrinization)

ความร้อน ความเข้มข้นของกรด และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเดกซ์ทรีไนเซชัน เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการผลิตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยเป็นอย่างมาก ซึ่งขั้นตอนการผลิตจำเป็นต้องใช้ความร้อน ความเข้มข้นของกรดสูง และใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานานเพื่อให้ได้ปริมาณใยอาหารที่สูง จากปัญหาดังกล่าว หากการเพิ่มพื้นที่ผิวหรือการดัดแปลงรูปร่างลักษณะของเม็ดแป้งมันสำปะหลังด้วยวิธีการใช้เอนไซม์ กรด และวิธีทางกล เพื่อให้แป้งมันสำปะหลังมีความไวต่อการทำปฏิกิริยามากขึ้น อาจนำไปสู่การผลิตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยให้มีปริมาณใยอาหารสูงได้โดยไม่ต้องใช้สภาวะในการผลิตที่รุนแรง ซึ่งก่อให้เกิดสิ่งแวดล้อมไปจนถึงสิ้นน้ำตาลที่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์

ทำให้ต้องมีกระบวนการย่อยด้วยเอนไซม์เพื่อเพิ่มปริมาณใยอาหาร การฟอกสีเพื่อเพิ่มความขาว กระบวนการกำจัดเกลือและไอออนต่างด้วยเครื่องมือที่ซับซ้อนมีราคาแพง และใช้พลังงานสูง (Okuma and Wakabayashi, 2001)

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาวิธีการดัดแปรพื้นผิวของสตาร์ชมันสำปะหลังด้วยการใช้เอนไซม์ กรด และวิธีทางกล และตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพของสตาร์ชดัดแปรพื้นผิว

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของพื้นผิวและลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกันของสตาร์ชดัดแปรพื้นผิวต่อคุณสมบัติของเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย

1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

การเพิ่มพื้นที่ผิวของสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนการนำไปผลิตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยมีผลต่อประสิทธิภาพในการผลิตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย เนื่องจากมีพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยา hydrolysis, ransglucosidation และ repolymerization ในกระบวนการเดกซ์ทรีไนเซชันมากขึ้น ทำให้ได้เดกซ์ทรินด้านทานการย่อยที่มีปริมาณใยอาหารสูงกว่าสตาร์ชมันสำปะหลังดิบที่สภาวะการผลิตเดียวกัน

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการดัดแปรพื้นผิวของสตาร์ช โดยการย่อยสตาร์ชด้วยเอนไซม์แบบเดี่ยว คือ ใช้เอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเพียงอย่างเดียว เอนไซม์อะมิโลกลูโคสเดสเพียงอย่างเดียว และแบบผสมระหว่างเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคสเดสร่วมกัน การดัดแปรพื้นผิวดังกล่าวด้วยวิธีทางเคมี คือการย่อยสตาร์ชด้วยกรดไฮโดรคลอริก และดัดแปรพื้นผิวด้วยวิธีทางเคมีร่วมกับวิธีทางกล คือ นำสตาร์ชที่ดัดแปรด้วยกรดมาบดด้วย ball mill จากนั้นนำไปเตรียมเป็นเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย และตรวจสอบคุณสมบัติของเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยที่ผลิตได้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1. ได้ทราบผลของพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชมันสำปะหลังที่แตกต่างจากกระบวนการเตรียมที่แตกต่างกัน ต่อคุณสมบัติของเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยที่ผลิตได้

1.5.2. ได้วิธีการดัดแปรพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชที่เหมาะสมต่อการผลิตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยเพื่อให้มีปริมาณใยอาหารสูง

บทที่ 2

ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 อนุกรมวิธานของมันสำปะหลัง

มันสำปะหลัง เป็นพืชหัวชนิดหนึ่ง มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Manihot esculenta* Crantz อยู่ในวงศ์ Euphorbiaceae และจาก 98 สายพันธุ์ที่อยู่ในสกุล *Manihot* มันสำปะหลังเป็นเพียงสายพันธุ์เดียวที่มีการเพาะปลูกกันอย่างแพร่หลายสำหรับการผลิตเป็นอาหารและแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ (Rogers and Appan, 1973; Onwueme, 1978; Mkumbira, 2002; Nassar, 2005) พันธุ์ของมันสำปะหลังนั้นได้รับการจำแนกตามลักษณะทางสัณฐานวิทยา เช่น รูปร่างของใบ ขนาดความสูงของลำต้น ก้านใบ สีช่อดอก ลักษณะและสีของราก และปริมาณไซยาโนจีนิก กลูโคไซด์ (cyanogenic glucoside) ในราก เป็นต้น (Onwueme, 1978; Mkumbira, 2002; Nassar, 2005) ปริมาณไซยาโนจีนิก กลูโคไซด์ นั้นถูกใช้จำแนกสายพันธุ์มันสำปะหลังออกเป็น 2 กลุ่ม คือ พันธุ์ขม ซึ่งจะมีไซยาโนจีนิก กลูโคไซด์ กระจายอยู่ทั่วทั้งรากที่ใช้สะสมอาหารสูงกว่า 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของน้ำหนักหัวสด และพันธุ์หวาน จะมีปริมาณไซยาโนจีนิก กลูโคไซด์ในระดับที่ต่ำกว่า 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และส่วนใหญ่จะถูกเก็บสะสมอยู่ที่เปลือก ดังนั้นเนื้อของมันสำปะหลังพันธุ์หวานจึงปราศจากไซยาโนจีนิก กลูโคไซด์ (Mkumbira, 2002; Nassar, 2005)

รากหรือหัวของมันสำปะหลังนั้นเป็นแหล่งสะสมอาหาร ซึ่งประกอบด้วยเปลือกประมาณ 10-20% และส่วนที่รับประทานซึ่งได้มีสัดส่วน 80-90% ของน้ำหนักหัวสดนั้นประกอบด้วย น้ำ 60-65% คาร์โบไฮเดรต 30-35% โปรตีน 1-2% ไขมัน 0.2-0.4% เส้นใย 1.0-2.0% และแร่ธาตุ 1.0-1.5% (Nassar Costa, 1976; Onwueme, 1978; Nassar, 1986) ปริมาณคาร์โบไฮเดรตส่วนใหญ่จะประกอบด้วย สตาร์ช (starch) 20-25% ของหัวสด (Purseglove, 1968) และหัวมันสำปะหลังยังค่อนข้างอุดมไปด้วยวิตามินซี (35 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม น้ำหนักหัวสด) ในอาซิน วิตามินเอ วิตามินบีหนึ่ง และบีสอง เล็กน้อยอีกด้วย (Onwueme, 1978)

แป้งมันสำปะหลังที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ส่วนใหญ่จะนำไปใช้ในอาหารสำเร็จรูป เนื่องจากมีคุณสมบัติพิเศษในการช่วยการยึดเกาะ การแข็งตัว ทำให้เกิดความเข้มข้นได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้แป้งมันสำปะหลังสามารถนำมาแปรรูปเป็นสารให้ความหวาน เช่น กลูโคสไซรัป ฟรุคโตสไซรัป สารให้ความหวานที่มีพลังงานต่ำ เช่น น้ำตาล แอลกอฮอล์ต่าง ๆ และสารปรุงแต่ง เช่น ผงชูรส เป็นต้น (กล้าณรงค์ และคณะ, 2543)

2.2 สตาร์ช

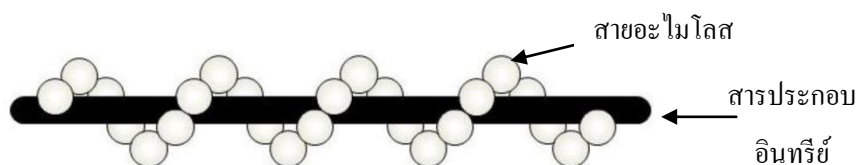
สตาร์ชเป็นแหล่งของพลังงานหลักที่ถูกเก็บสะสมอยู่ในเมล็ดธัญพืช พืชหัว และพืชตระกูลถั่ว ซึ่งอุดมไปด้วยคาร์โบไฮเดรตตามธรรมชาติสูง รองจากเซลลูโลสและไคติน ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักที่พบมากที่สุดในอาหาร และยังเป็นแหล่งพลังงานที่จำเป็นสำหรับการดำรงชีพของสิ่งมีชีวิตอีกด้วย สตาร์ชดิบ (Native starch) ตามธรรมชาติจะไม่ละลายในน้ำ ภายในเมล็ดสตาร์ชมีโครงสร้างลักษณะเป็นกึ่งผลึก (semi-crystalline) ซึ่งเกิดจากพอลิเมอร์ของกลูโคสประกอบด้วยอะมิโลส (amylose) และอะมิโลเพกติน (amylopectin) แต่อย่างไรก็ตามองค์ประกอบภายในเมล็ดสตาร์ชนั้นมีความหลากหลายแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ หรือแม้แต่สายพันธุ์เดียวกันแต่สถานะในการเจริญเติบโตต่างกัน องค์ประกอบภายในก็อาจแตกต่างกันได้ ความหลากหลายที่เห็นได้ชัดของสตาร์ชแต่ละชนิด คือ รูปร่างของเมล็ดสตาร์ช ปริมาณอะมิโลส โครงสร้างกิ่งของอะมิโลเพกติน (การกระจายของสายโซ่และตำแหน่งของกิ่ง) และการจัดเรียงโครงสร้างของทั้งอะมิโลสและอะมิโลเพกตินให้เป็นโครงสร้างผลึกและอสัณฐานภายในเมล็ดสตาร์ช จากความแตกต่างเหล่านี้ส่งผลต่อคุณสมบัติของสตาร์ช เช่น การบวมน้ำ การคั้นตัว การเกิดเจล ความหนืด และความไวต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้มีความสำคัญต่อกระบวนการแปรรูปอาหารและโภชนาการของมนุษย์ (Copeland et al., 2009; Wang et al., 2011)

2.2.1 โครงสร้างของสตาร์ช

อะมิโลส และอะมิโลเพกติน เป็นสารที่รวมตัวกันในรูปแบบที่ไม่ละลายน้ำ เม็ดสตาร์ชที่มีรูปแบบโครงสร้างการจัดเรียงตัวแบบกึ่งผลึก มีลักษณะการเรียงตัวแบบวงแหวนเป็นชั้น ๆ ขนาดของเม็ดสตาร์ช รูปร่าง ความเป็นผลึก และการจัดเรียงโมเลกุลภายในนั้นแปรผันตามแหล่งกำเนิดของสตาร์ช สตาร์ชดิบโดยทั่วไปมีปริมาณอะมิโลสประมาณ 20-30% และมีปริมาณอะมิโลเพกตินประมาณ 70-80% โดยน้ำหนัก ซึ่งอะมิโลสเป็นโมเลกุลเชิงเส้นที่มีหน่วยของกลูโคสเกือบทั้งหมดเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1, 4 และมีการเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1, 6 เป็นปริมาณน้อยกว่า 0.5%

อะมิโลส มีมวลโมเลกุลอยู่ในช่วง 10^5 - 10^6 ดาลตัน หรือประกอบด้วยหน่วยย่อยของกลูโคส 500-6,000 หน่วย ซึ่งอะมิโลสไม่ใช่สารที่สำคัญสำหรับการเกิดเป็นเม็ดสตาร์ชโดยดูได้จากลักษณะทางสัณฐานของเม็ดสตาร์ชที่หลากหลายนั้น ไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณของอะมิโลส นอกจากนี้ตำแหน่งของอะมิโลสภายในเม็ดสตาร์ชนั้นขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของสตาร์ช อะมิโลสบางส่วนอยู่ในกลุ่มของอะมิโลเพกติน และบางส่วนกระจายอยู่ทั้งในส่วนของบริเวณอสัณฐาน และบริเวณผลึก ซึ่งสายโซ่ของอะมิโลส มีลักษณะเป็นแบบเกลียวม้วนเดี่ยว (single helix) ภายในโครงสร้างของสายโซ่เกลียวจะมีอะตอมของไฮโดรเจนซึ่งเป็นตัวช่วยให้อะมิโลส สามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับกรดไขมันอิสระ กรดไขมันกลีเซอไรด์ แอลกอฮอล์บางชนิด และไอโอดีนได้ (ภาพที่

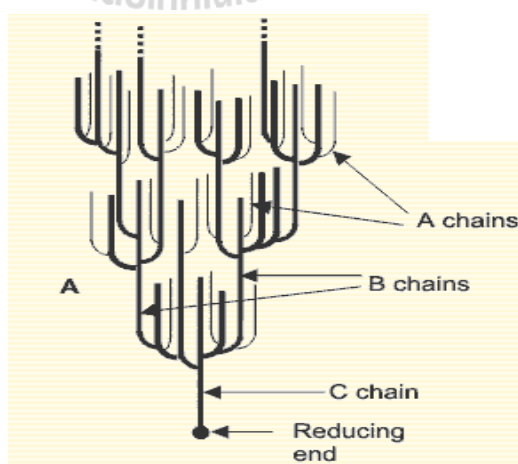
2.1) (Fennema, 1985) ซึ่งการรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของอะมิโลสกับไอโอดีนแล้วให้สีน้ำเงินนั้น เป็นลักษณะเฉพาะที่บ่งบอกถึงสตาร์ชที่มีองค์ประกอบของอะมิโลส (กล้านรงค์ และ เกื้อกูล, 2543)



ภาพที่ 2.1 ภาพจำลองการจับตัวของอะมิโลสกับสารประกอบอินทรีย์

ที่มา: Kadokawa, 2013

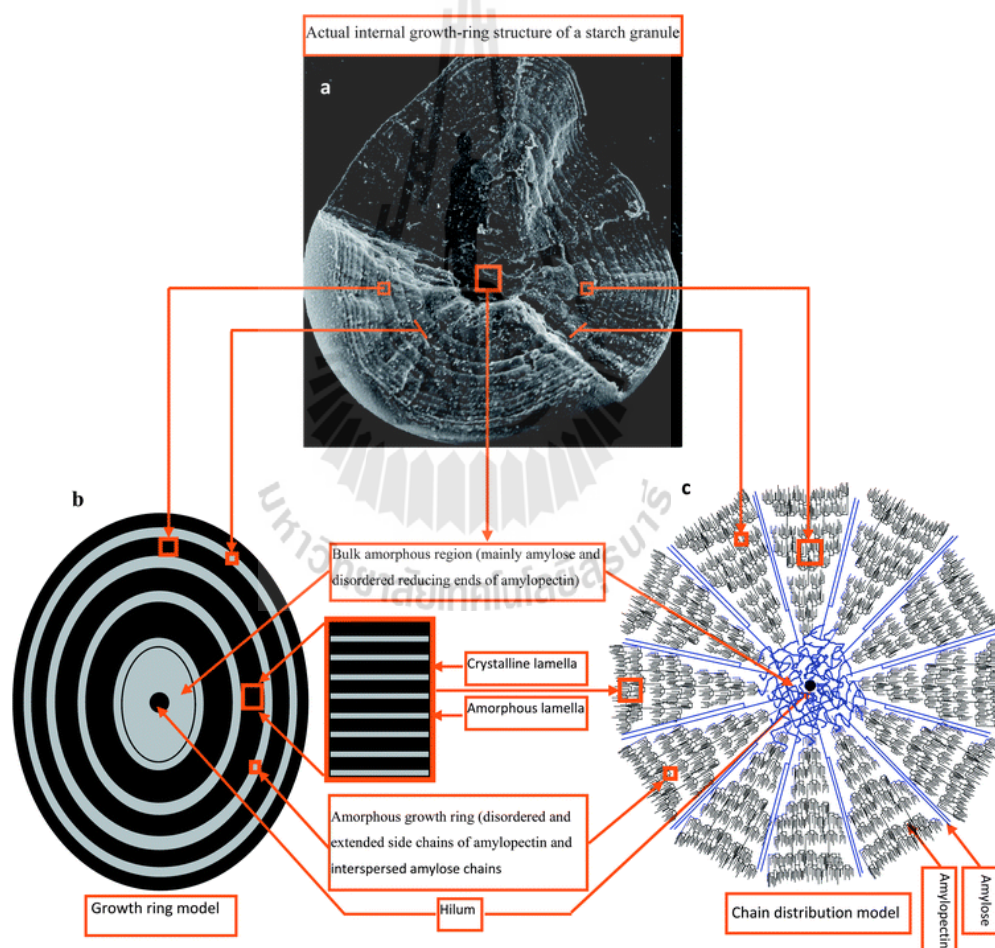
อะมิโลเพคติน เป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ที่ประกอบด้วยกิ่งก้านสาขา มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 10^7 - 10^9 ดาลตัน แกนหลักของอะมิโลเพคตินประกอบด้วยกลูโคส 10-60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -(1-4) และสายโซ่ที่เป็นกิ่งสาขาประกอบด้วยกลูโคส 15-45 หน่วย โดยเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -(1-6) ซึ่งจุดเชื่อมต่อของกิ่งก้านที่เกิดขึ้นมีปริมาณ 5% ของหน่วยกลูโคสทั้งหมดในอะมิโลเพคติน (Buléon et al., 1998) อะมิโลเพคตินสามารถจำแนกออกเป็น 3 ชนิด ตามความยาวของสายโซ่ คือ สาย A สาย B และสาย C (Hizukuri, 1986) โดย A เป็นสายที่ไม่มีกิ่งเชื่อมต่อออกจากสาย B เป็นโครงสร้างกิ่งที่เชื่อมต่อกับสายอื่นอีก 2 สาย หรือมากกว่า และ C เป็นสายแกนที่ประกอบด้วยหน่วยรีดิวซิง 1 หมู่ ซึ่งในอะมิโลเพคติน 1 โมเลกุล จะมีสาย C อยู่ 1 สายเท่านั้น (กล้านรงค์ และ เกื้อกูล, 2543)



ภาพที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างอะมิโลเพคตินที่ประกอบด้วยสาย A B C และหมู่รีดิวซิง

ที่มา: Parker and Ring, 2001

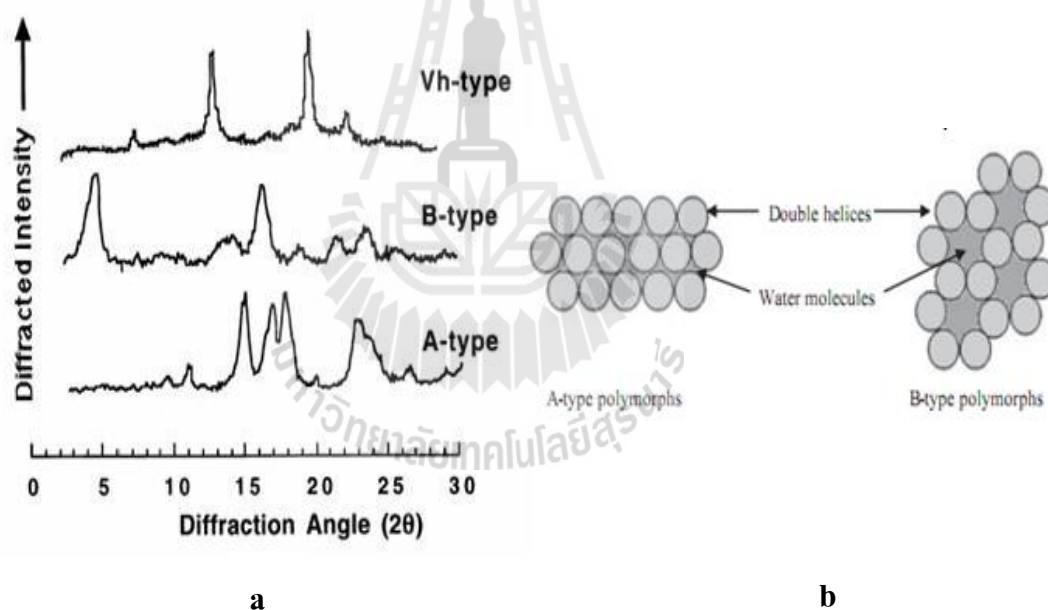
จากภาพที่ 2.3a แสดงภาพตัดขวางของเม็ดสตาร์ช จะเห็นว่าแกนกลางของเม็ดสตาร์ชมีความเสียหายเป็นอย่างมากในขณะที่บริเวณรอบ ๆ ของส่วนผลึกและอสัณฐานยังคงรูปไม่เกิดความเสียหาย จากภาพที่ 2.3b และ c แสดงให้เห็นว่าส่วนที่อยู่รอบ ๆ ไฮลัม (hilum) ซึ่งประกอบด้วยโมเลกุลของอะมิโลสและอะมิโลเพคตินเป็นหลัก ซึ่งกระจายตัวอยู่ในส่วนของอสัณฐาน และไม่มี การกระจายเข้าไปยังส่วนของผลึกแต่อย่างใด บริเวณใจกลางของเม็ดสตาร์ชถูกล้อมรอบด้วยวงแหวนกึ่งผลึก สลับกับวงแหวนของส่วนอสัณฐานที่มีความหนาสม่ำเสมอ การเจริญของวงแหวนกึ่งผลึกมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นโมเลกุลของอะมิโลเพคติน สลับกับโมเลกุลของอะมิโลส ส่วนวงแหวนของส่วนอสัณฐานมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นกลุ่มสายโซ่ของอะมิโลเพคตินสลับกับโมเลกุลของอะมิโลสเชื่อมต่อกันในบริเวณผลึก (Wang and Copeland, 2014)



ภาพที่ 2.3 แผนภาพแสดงการจัดเรียงโครงสร้างของสตาร์ชจากถั่ว โดย a) แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของเม็ดสตาร์ชที่ถูกย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 2 วัน b) แผนภาพอธิบายการเจริญในลักษณะวงแหวน และ c) แสดงการกระจายของสายโซ่

ที่มา: Wang et al., 2011

การจัดเรียงตัวของสตาร์ชที่แสดงลักษณะโครงสร้างแบบกึ่งผลึก สามารถจำแนกลักษณะโครงสร้างผลึกออกเป็น 3 ชนิด ขึ้นอยู่กับความหนาของเกลียวคู่ที่จัดเรียงตัวอยู่ในเม็ดสตาร์ช โดยสตาร์ชจากธัญพืชและจากมันสำปะหลัง จะแสดงโครงสร้างผลึกแบบ A (A-type) ซึ่งมีการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่หนาแน่นมาก ส่วนโครงสร้างผลึกที่มีการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่แบบหลวม ๆ จะแสดงโครงสร้างผลึกเป็นแบบ B (B-type) ซึ่งพบได้ในสตาร์ชจากพืชหัว และสตาร์ชที่แสดงโครงสร้างผลึกทั้งแบบ A และ B รวมกัน เรียกว่าโครงสร้างผลึกแบบ C (C-type) ซึ่งพบได้ในสตาร์ชจากพืชตระกูลถั่ว และนอกจากนี้ยังมีโครงสร้างผลึกของสตาร์ชแบบ V (V-type) ซึ่งเกิดจากการที่อะมิโลสไปเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอื่น เช่น ไอโอดีน DMSO แอลกอฮอล์ และกรดไขมันอีกด้วย (Buléon et al., 1998b) การวิเคราะห์ปริมาณผลึกและการจำแนกชนิดของโครงสร้างผลึกสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้เครื่อง X-ray diffraction (XRD) โดยรูปแบบการหักเหรังสีเอ็กซ์เรย์และลักษณะการจัดเรียงของผลึกแบบ A และ B แสดงดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 รูปแบบการหักเหรังสีเอ็กซ์เรย์ (a) และลักษณะการจัดเรียงของผลึกแบบ A และ B (b)
ที่มา: Buleon et al., 1998; Wang and Copeland, 2014

2.2.2 ลักษณะรูปร่างของเม็ดสตาร์ช

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเม็ดสตาร์ชนั้นมีความแตกต่างกันตามแหล่งกำเนิด โดยรูปร่างและรูปร่างจะมีความหลากหลาย บางชนิดมีลักษณะเป็นทรงกลมรูปไข่ เหลี่ยม กลมแบน และทรงกลมยาวคล้ายไต และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 1 ไมครอน ไปจนถึง 100

ไมครอน ซึ่งสตาร์ชบางชนิดจะมีรูพรุนบนพื้นผิว เช่น สตาร์ชข้าวฟ่างและสตาร์ชข้าวโพด บางชนิดไม่พบรูพรุนบนพื้นผิวและมีพื้นผิวที่เรียบ เช่น สตาร์ชจากมันฝรั่ง แป้งท้าวยายม่อม (arrowroot starch) และแป้งพุทธรักษา (canna flour) (Fannon et al., 1993) การค้นพบช่องเปิดที่ทะลุเข้าไปภายในเม็ดสตาร์ชถูกค้นพบโดย Huber and BeMiller (1997) เส้นผ่านศูนย์กลางของรูที่พบบนพื้นผิวของสตาร์ชข้าวฟ่างมีขนาดประมาณ 0.1-0.3 ไมครอน ซึ่งรูและช่องที่เกิดขึ้นมีความสอดคล้องกับการศึกษาของ MacGregor and Ballance (1980) ได้กล่าวว่าเอนไซม์จะเข้าทำลายบนพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชผ่านช่องเปิดเข้าไปยังภายในของเม็ดสตาร์ช และทำลายเม็ดสตาร์ชจากภายในสู่ภายนอกพื้นผิว ซึ่งความสามารถในการเข้าทำลายเม็ดสตาร์ชที่เกิดจากการแพร่เข้าไปภายในเม็ดสตาร์ชของเอนไซม์และทำลายออกมาสู่ผิวนอกนั้นยังถูกยืนยันโดยการศึกษาอื่น ๆ อีกด้วย (Sujka and Jamroz, 2007)

2.3 สตาร์ชดัดแปรพื้นผิว

สตาร์ชถูกใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย และในหลายอุตสาหกรรมมักจะดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น ดัดแปรด้วยวิธีทางเคมี ทางกายภาพ ทางชีวภาพ และทางกล เพื่อให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมก่อนการนำไปใช้งาน

ในธรรมชาติสตาร์ชมีการจัดเรียง โครงสร้างที่ค่อนข้างเป็นระเบียบ หรือกึ่งผลึก (semi-crystalline) ตามรายงานของ Fannon et al. (1992) และ Gallant et al. (1997) ได้กล่าวว่า สตาร์ชข้าวโพด ข้าวฟ่าง ข้าวสาลี ข้าวบาร์เลย์ ข้าวไรย์ และสตาร์ชจากลูกเดือยนั้นมีรูพรุนโดยธรรมชาติบนพื้นผิวของแกรนูล แต่อย่างไรก็ตาม กระบวนการแปรรูปต่าง ๆ เช่น การทำแห้ง หรือการย่อยด้วยเอนไซม์ อาจมีอิทธิพลต่อปริมาณ และขนาดรูพรุนของสตาร์ชแกรนูลได้ นอกจากนี้ Huber and BeMiller (2000) และ Kim and Huber (2008) ยังได้รายงานถึงการมีอยู่ของช่องและรูพรุนภายในโครงสร้างของสตาร์ชข้าวโพด ข้าวฟ่าง และข้าวสาลี เช่นกัน และจากรายงานก่อนหน้านี้ของ Fannon et al. (1993) และ Baldwin et al. (1994) ได้ตั้งสมมติฐานว่ารูพรุนบนพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชอาจเป็นช่องเปิดที่นำไปสู่ภายในของเม็ดสตาร์ช

ความพรุนของเม็ดสตาร์ชนั้นเป็นลักษณะที่สำคัญที่มีต่อความไวต่อการเข้าทำปฏิกิริยาของเอนไซม์และการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี (Fannon et al., 2004) แต่โดยธรรมชาติของสตาร์ชมันสำปะหลังนั้นมีลักษณะของเม็ดสตาร์ชเป็นทรงกลมปลายด้านหนึ่งถูกตัดคล้ายปากแตรโดยเรียกบริเวณนี้ว่า “turncature” และสตาร์ชมันสำปะหลังนั้นไม่มีรูพรุนบนพื้นผิว จึงเป็นจุดที่น่าสนใจต่อการดัดแปรพื้นผิวให้มีรูพรุนขึ้นเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาต่าง ๆ และใช้ในประโยชน์ในด้านอื่น ๆ ต่อไป ซึ่งสามารถดัดแปรได้ด้วยวิธีดังต่อไปนี้

2.3.1 การตัดแปรพื้นผิวสตาร์ชด้วยกรด

กรดซัลฟูริกและกรดไฮโดรคลอริกนั้น ถูกนำมาใช้ในการตัดแปรสตาร์ชเป็นเวลานานมาแล้ว ซึ่งสตาร์ชที่ถูกย่อยด้วยกรดซัลฟูริกจะเรียกว่า Ngeli amylopectin และสตาร์ชที่ถูกย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริกจะเรียกว่า lintnerised starch (Robyt et al, 1996) อัตราการย่อยเม็ดสตาร์ชโดยใช้กรดนั้น สามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วงที่แตกต่างกัน โดยช่วงเริ่มต้นของการย่อยอัตราการย่อยจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ในช่วงนี้กรดจะเข้าไปย่อยบริเวณออสันฐานของสตาร์ช บริเวณออสันฐานของสตาร์ชนั้นมีความไวต่อการถูกย่อยด้วยกรด เนื่องจากในส่วนของออสันฐานสายโซ่ของสตาร์ชมีการจับตัวกันอย่างหลวม ๆ เมื่อเทียบกับส่วนของผลึก ซึ่งในช่วงแรกของการย่อยนี้ส่วนออสันฐานที่ถูกทำลายไป จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของขนาด รูปร่างพื้นผิว ปริมาณอะมิโลส และปริมาณของสายโซ่ของอะมิโลสที่รวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไขมัน ส่วนช่วงที่ 2 ของอัตราการย่อยนั้นจะช้ากว่าในช่วงแรก เมื่อการย่อยเกิดขึ้นทั้งส่วนของออสันฐานและส่วนของผลึกของสตาร์ช ในช่วงนี้จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณอะมิโลเพคติน การกระจายตัวของพันธะ α -1, 6 ระหว่างชั้นของออสันฐานและผลึก และการจัดเรียงเกลียวคู่ภายในบริเวณผลึก (Le Corre et al., 2010) แต่บางการศึกษาได้เสนออัตราการย่อยว่าสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงที่ย่อยอย่างรวดเร็ว ช้า และช้ามาก ซึ่งการย่อยจะเริ่มที่บริเวณออสันฐาน บริเวณกิ่งผลึกและบริเวณผลึกตามลำดับ (Li et al., 2007) นอกจากนี้ยังมีสมมติฐานอีก 2 ข้อ เกี่ยวกับสาเหตุการย่อยที่เกิดขึ้นช้าในบริเวณส่วนผลึกของเม็ดสตาร์ช โดยข้อแรกอาจเกิดจากการรวมตัวกันอย่างหนาแน่นของสายโซ่สตาร์ชภายในบริเวณผลึก ทำให้ไฮโดรเจนไอออนไม่สามารถแพร่เข้าไปในส่วนนี้ได้ง่ายนัก ส่วนข้อที่สองอาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของ glucopyranose rings จากรูปแบบ chair ไปเป็น half-chair ซึ่งจำเป็นต้องการสลายพันธะกลูโคซิดิกนั้นเกิดขึ้นได้ช้า เนื่องจากน้ำตาลภายในผลึกของสตาร์ชถูกตรึงไม่ให้เคลื่อนที่ (Kainuma and French, 1971)

ปริมาณและรูปแบบผลึกของสตาร์ชที่ถูกย่อยด้วยกรดเมื่อตรวจสอบด้วย XRD ปรากฏว่ามีการเพิ่มขึ้นของพีคที่ตำแหน่ง 2θ ที่ 15-30 ในช่วงแรกของการย่อยสตาร์ช ซึ่งสาเหตุเกิดจากบริเวณของส่วนออสันฐานที่ถูกทำลายไปส่งผลให้สัดส่วนของปริมาณผลึกเพิ่มขึ้น นอกจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณผลึกเมื่อย่อยสตาร์ชด้วยกรดแล้ว รูปแบบของการหักเหรังสีเอ็กซ์เรย์ (X-ray pattern) อาจมีการเปลี่ยนแปลงไปได้อีกด้วย โดยส่วนใหญ่แล้วการย่อยสตาร์ชด้วยกรดมักไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของ X-ray pattern แต่บางการศึกษาพบว่าการย่อยสตาร์ชด้วยกรดมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ X-ray pattern จากรูปแบบผลึกแบบ A ไปเป็น C หรือ A ไปเป็น B (Buléon et al., 1987; Planchot et al., 1997; Vermeylen et al., 2004)

ผลของการย่อยสตาร์ชด้วยกรดต่อการเปลี่ยนแปลงทางรูปร่างของเม็ดสตาร์ช มีการศึกษาเป็นจำนวนมาก ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามแหล่งกำเนิดของสตาร์ชและระดับการถูกย่อยด้วยกรด การ

ย่อยในระดับที่ไม่รุนแรงนั้นไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของลักษณะทางสัณฐานของเม็ดสตาร์ช (Atichokudomchai et al., 2000; Wang and Wang, 2001; Franco et al., 2002; Jayakody and Hoover, 2002; Campanha and Franco, 2011) เม็ดสตาร์ชยังคงรูปร่างเหมือนเดิม แต่พื้นผิวภายนอกมีความหยาบและขรุขระเพิ่มขึ้น เมื่อตรวจสอบด้วย SEM ที่กำลังขยายสูง (Wang et al., 2012) ส่วนการย่อยในระดับที่รุนแรงส่งผลให้ภายในของเม็ดสตาร์ชถูกทำลาย ซึ่งโครงสร้างภายในของสตาร์ชจะถูกทำลายจนกลายเป็นเกล็ดของผลึกนาโน (platelet nanocrystals) (Le Corre et al., 2011) นอกจากการเปลี่ยนแปลงทางลักษณะพื้นผิวภายนอกของสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดจะเปลี่ยนแปลงไปแล้ว การกระจายตัวของขนาดเมื่อตรวจสอบโดย laser-light scattering ก็มีการเปลี่ยนแปลงไปด้วยเช่นกัน (Wang et al., 2011)

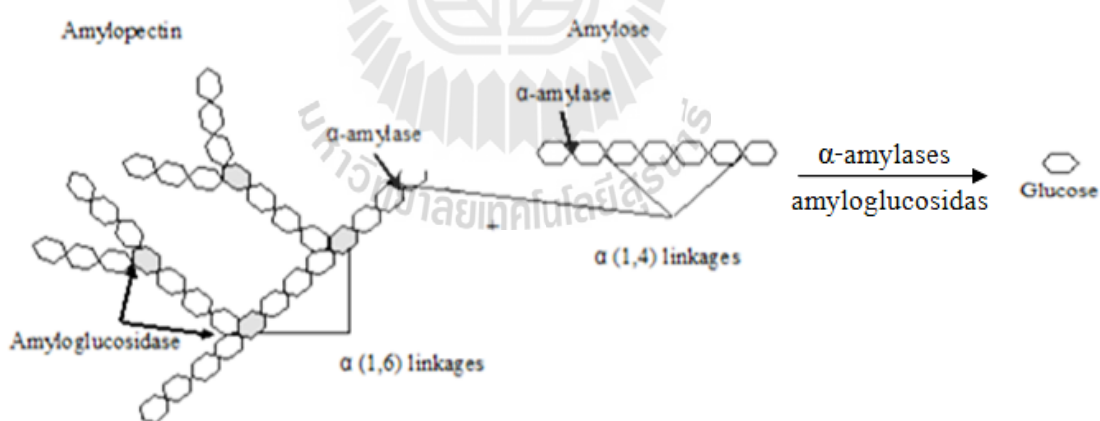
Atichokudomchai et al. (2000) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางสัณฐานวิทยาของการตัดแปรสตาร์ชมันสำปะหลังด้วยการใช้กรดไฮโดรคลอริก 6% ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12-768 ชั่วโมง โดยติดตามการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ amylose และการใช้ SEM พบว่าเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ปริมาณ amylose จะลดลง และบริเวณผลึกจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากกรดจะเข้าไปทำลายบริเวณอสัณฐาน ทำให้ได้บริเวณผลึกที่สูงขึ้น เมื่อกรดเข้าทำปฏิกิริยากับเม็ดสตาร์ช ผิวชั้นนอกจะถูกกัดกร่อนและมีลักษณะที่ขรุขระ เมื่อผิวชั้นนอกถูกกัดกร่อนออกไปจนหมด จะสังเกตเห็นผิวที่เรียบของชั้นถัดมา และเมื่อการย่อยดำเนินต่อไปเรื่อย ๆ ผิวชั้นถัดมาก็ถูกกัดกร่อนอีกเช่นกัน ส่วนเม็ดสตาร์ชที่ถูกย่อยที่เวลาแตกต่างกันเมื่อนำไปทำแห้งแบบพ่นฝอยแล้ว พบว่าลักษณะของเม็ดสตาร์ชไม่แตกต่างไปจากเดิม

2.3.2 การตัดแปรพื้นผิวสตาร์ชด้วยเอนไซม์

การย่อยด้วยเอนไซม์เป็นหนึ่งในวิธีการตัดแปรสตาร์ชที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งมีส่วนสำคัญเป็นอย่างมากสำหรับกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมที่มีการใช้สตาร์ชเป็นวัตถุดิบในกลุ่มของ amylolytic enzymes เอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (amylglucosidase) และเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (α -amylases) มีความสำคัญเป็นอย่างมากในกระบวนการผลิต โดยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเป็นเอนไซม์ที่ย่อยโมเลกุลของสตาร์ชจากภายนอก (exo-acting enzymes) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นกลูโคส (D-glucose) โดยจะตัดพันธะที่จับกันของน้ำตาลกลูโคสทีละหนึ่งหน่วยทั้งพันธะ α -1, 4 และ α -1, 6 โดยเริ่มตัดจากปลายของส่วน non-reducing ส่วนเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสทำหน้าที่เป็นเอนไซม์ที่ย่อยโมเลกุลของสตาร์ชจากภายใน (endo-acting enzymes) ลักษณะการทำงานเป็นการสุมตัดภายในโดยจะตัดเฉพาะพันธะ α -1, 4 ของสตาร์ช นอกจากนี้การใช้เอนไซม์ผสมระหว่างเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสและเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส นั้น มีการทำงานที่ส่งเสริมกันเมื่อนำมาใช้ร่วมกัน (Zhang et al., 2013) โดยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสจะย่อยพอลิเมอร์ของสตาร์ช

ให้เป็นเดกซ์ทริน จากนั้นเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสจะย่อยเดกซ์ทรินให้เป็นกลูโคสอีกครั้ง ซึ่งลักษณะการทำงานของเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสและอะมิโลกลูโคซิเดสแสดงดังภาพที่ 2.5

การเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างผลึกของสตาร์ชตามรายงานของ Uthumporn et al. (2010) ได้ศึกษาการย่อยสตาร์ชที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิของการเกิดเจลด้วยเอนไซม์ผสมระหว่างเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสและเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสกับสตาร์ชต่างชนิดกัน จากการศึกษาพบว่า สตาร์ชจากข้าวโพดและมันสำปะหลังแสดงลักษณะของผลึกแบบ A ในขณะที่สตาร์ชจากสาเกและสตาร์ชจากถั่วเขียวแสดงลักษณะทางผลึกแบบ C ซึ่งลักษณะทางโครงสร้างของผลึกหลังจากย่อยด้วยเอนไซม์ไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปจากสตาร์ชเริ่มต้นของแต่ละชนิด แต่พืคมีความสูงเพิ่มขึ้นและมีปริมาณผลึกเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าการย่อยสตาร์ชที่สภาวะนี้ทำให้ปริมาณผลึกของสตาร์ชมีค่าเพิ่มขึ้นและไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของโครงสร้างผลึก (ยกเว้นสตาร์ชจากมันสำปะหลังที่แสดงการลดลงของปริมาณผลึก) ซึ่งการเพิ่มขึ้นของผลึกแสดงให้เห็นว่าส่วนของออสติฐานถูกย่อยออกไปมากกว่าส่วนของผลึก ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Gallant et al. (1972) ได้เสนอว่าการย่อยจะเกิดขึ้นที่ส่วนของออสติฐานของเม็ดสตาร์ชก่อนเป็นอันดับแรก ส่วนปริมาณผลึกที่ลดลงของตัวอย่างจากสตาร์ชมันสำปะหลัง อาจเกิดจากอะมิโลเพคตินบางส่วนในบริเวณผลึกอาจถูกย่อยออกไป ทำให้ปริมาณผลึกของสตาร์ชหลังถูกย่อยนั้นมีค่าลดลง



ภาพที่ 2.5 การย่อยสลายสตาร์ชด้วย amylolytic enzymes

ที่มา: Fabiano et al., 2013

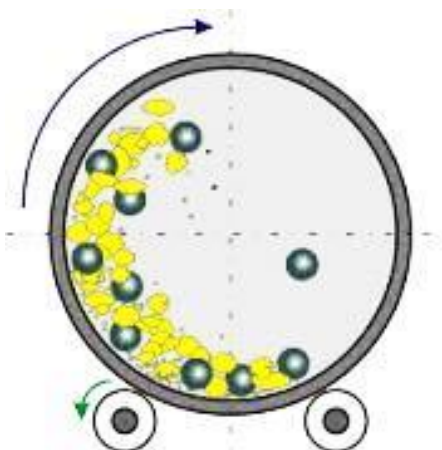
โมเลกุลของเอนไซม์มีผลต่อพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชในหลากหลายรูปแบบ จากการศึกษาของ Sujka and Jamroz (2006) ได้จำแนกรูปแบบของเม็ดสตาร์ชที่เกิดขึ้นหลังจากการย่อยด้วยเอนไซม์ไว้ 5 แบบคือ ลักษณะรูเข็ม (pin-holes) ลักษณะการกัดกร่อนเหมือนฟองน้ำ (sponge-like

erosion) หลุมขนาดกลางจำนวนมาก (numerous medium-sized holes) รูในตำแหน่งที่แตกต่างกัน จนนำไปสู่หลุมเดี่ยว และการกัดเซาะพื้นผิว (surface erosion) โดยทั่วไปแล้วเอนไซม์สามารถกัดกร่อนได้ทั่วทั้งพื้นผิวภายนอกของเม็ดสตาร์ช (exo-corrosion) หรือเข้าไปย่อยภายในเม็ดสตาร์ช โดยผ่านทางช่องเปิดที่อยู่บนผิวของเม็ดสตาร์ช (endo-corrosion) จากรายงานได้กล่าวว่า สตาร์ช มันฝรั่งจะถูกกัดกร่อนเล็กน้อยที่พื้นผิวนอก ในขณะที่สตาร์ชจากข้าวสาลี บาร์เลย์ ข้าวฟ่าง และสตาร์ชจากพืชหัวในเขตร้อนจะมีส่วนที่ไวต่อการกัดเซาะด้วยเอนไซม์จนเกิดเป็นรูเล็ก ๆ ส่งผลให้เอนไซม์สามารถเข้าไปย่อยจากภายในเม็ดสตาร์ชได้ จากนั้นรูจะค่อย ๆ ขยายใหญ่ขึ้นทำให้เกิดช่องที่นำไปสู่ภายในของเม็ดสตาร์ช นอกจากนี้สตาร์ชจากข้าวโพดและข้าวจะถูกกัดเซาะผ่านรูเล็ก ๆ ที่เกิดขึ้นจนทำให้เกิดช่องที่ลึกเข้าไปภายในเม็ดสตาร์ชได้เช่นกัน (Oates, 1997) ทั้งนี้วิธีการย่อยของสตาร์ชนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของสตาร์ชและชนิดของเอนไซม์ที่ใช้ (Planchot et al., 1995)

การนำเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส และอะมิโลกลูโคซิเดส มาช่วยในการดัดแปลงโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชให้เป็นรูพรุนนั้นมีการศึกษาโดยวิธีที่แตกต่างกันไป ซึ่งรูพรุนจะเกิดขึ้นในระหว่างการย่อยด้วยเอนไซม์ และรูที่เกิดขึ้นจะมีการกระจายตัวแบบสุ่มที่ผิวของเม็ดสตาร์ชเมื่อตรวจสอบโดยใช้เทคนิคของกล้อง SEM และพบว่าปริมาตร ขนาด และรูปร่างของรูพรุนนั้นเป็นตัวแปรที่สำคัญที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ และการซึมผ่านของสารเข้าไปภายในเม็ดแป้งที่แตกต่างกัน (Apinan et al., 2007; Baldwin, Adler, Davies, and Melia, 1998; Castro and Aguilera, 2007; Zhao, Madson, and Whistler, 1996)

2.3.3 การดัดแปรพื้นผิวสตาร์ชด้วย Ball-mill

Ball-mill เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถใช้ในการดัดแปลงลักษณะของเม็ดสตาร์ช ความเป็นผลึก การละลายน้ำ และการบวมตัวของสตาร์ชโดยใช้หลักของการกระทบ การลดขนาดด้วย ball-mill ที่ระดับต่ำ เมื่อสังเกตจากภาพความเสียหายของเม็ดสตาร์ชพบว่า จะมีความเสียหายบริเวณผิวหน้าของเม็ดสตาร์ชเกิดขึ้น และพื้นผิวมีลักษณะที่หยาบและขรุขระ (Tamaki et al., 1997) ball-mill เป็นวิธีการดัดแปรทางกลที่ทำให้เม็ดสตาร์ชมีขนาดเล็กลง โดยอาศัยหลักการของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางทำให้ลูกบอลเซรามิกเกิดการเคลื่อนที่หรือเสียดสีเข้ากับเม็ดสตาร์ช จนทำให้พื้นผิวเม็ดสตาร์ชเกิดรอยแตกร้าวและแตกออกจนกลายเป็นอนุภาคของสตาร์ชที่มีขนาดเล็กลง มีขั้นตอนการทำที่ง่ายไม่ซับซ้อน ในอดีตมีการดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีนี้ ในตัวอย่างสตาร์ชหลายชนิด เช่น สตาร์ชจากสาลี ข้าวโพด มันฝรั่ง เป็นต้น (Jane et al., 1992; Lim et al., 1992; Daniel and Whistler, 1990; Griffin, 1989) การลดขนาดอนุภาคด้วยวิธีนี้จะมีแรงกระทำทางกลต่าง ๆ เข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น แรงเสียดทาน แรงกระทบ แรงเฉือน และแรงอื่น ๆ เพื่อดัดแปรโครงสร้างและคุณสมบัติของเม็ดสตาร์ช (Huang et al., 2008)



ภาพที่ 2.6 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของตัวอย่างและลูกบอลภายในหม้อบด

ที่มา: <http://www.alibaba.com/product-detail/Ball-Mill-cone-type-of-energy>

หลักการทั่วไปของการลดขนาดด้วยวิธีการ ball-mill คือ การให้วัตถุติดถูกกระแทก (Catacting/Impact grinding force) และ/หรือขัดสี (Abrasion/Attrition grinding force) ด้วยลูกบอลจนเกิดการแตกและสลายตัวเล็กลงจนได้ขนาดตามที่ต้องการ ซึ่งเทอมที่ใช้เรียกการลดขนาดจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับช่วงของอนุภาคที่เกิดขึ้น ดังนี้

- compression หรือ crushing จะเป็นการลดขนาดของของแข็งที่อนุภาคมีความแข็งแรงมาก อนุภาคหลังลดขนาดจะมีลักษณะหยาบ มีความละเอียดน้อย

- impact หรือ grinding อนุภาคของของแข็งหลังจากลดขนาดด้วยวิธีนี้จะได้อนุภาคที่มีลักษณะที่หยาบ ปานกลาง และละเอียด

- attrition หรือ milling เป็นการลดขนาดอนุภาคที่มีความอ่อน (soft) หลังจากลดขนาดแล้วจะได้อนุภาคที่มีความละเอียดมาก

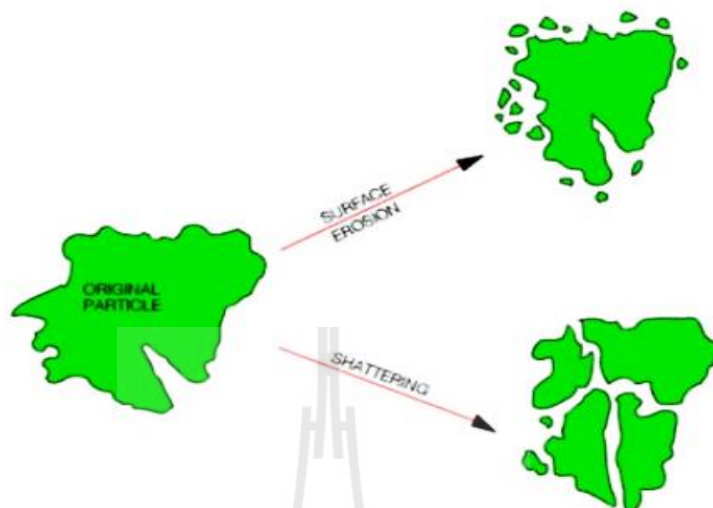
- cutting หรือการตัด เป็นแรงกระทำที่มีลักษณะคล้ายกับการใช้ของมีคมตัด ทำให้วัตถุเกิดการเสียรูปปร่าง (deformation) การแตกของวัตถุจะเกิดขึ้นน้อยที่สุด ผิวของวัตถุจะไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งการตัดจะได้ขนาดที่แน่นอน และบางครั้งก็ได้รูปปร่างที่แน่นอนด้วย เช่น การตัดผักผลไม้ เป็นต้น

กลไกการแตก (Breakage mechanism) ประกอบด้วย 2 กลไกหลัก คือ

1. Shattering เป็นกลไกที่ทำให้อนุภาคมีขนาดเล็กลง 2-5 เท่า ของอนุภาคเริ่มต้น

2. Erosion หรือ Abrasion เป็นกลไกที่ทำให้อนุภาคส่วนใหญ่มีขนาดเล็กลงมากกว่า 10 เท่า ของอนุภาคเริ่มต้น

กลไกการแตกในระบบที่เป็นจริงนั้นทั้งสองกลไกจะเกิดขึ้นพร้อมกัน แต่ต่างกันตรงที่ กลไกใดกลไกหนึ่งจะเกิดขึ้นได้มากกว่า แสดงดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 กลไกการแตกของอนุภาค

ที่มา: Popplewell et al., 1989

ปัจจัยที่ต้องนำมาพิจารณา เพื่อให้การบดด้วย ball-mill มีประสิทธิภาพ ประกอบด้วย

1. คุณสมบัติเฉพาะตัวของวัตถุดิบ เช่น แหล่งกำเนิด ขนาด และความสามารถในการแตกตัว
2. ความเร็วรอบในการโม่บด
3. ปริมาณลูกบอลและการกระจายขนาดอนุภาคของลูกบอล
4. ขนาดของวัตถุดิบต่อลูกบอล
5. ความหนาแน่นและความเหนียวของวัตถุดิบที่ใช้ในการบดแบบเปียก
6. อัตราส่วนของวัตถุดิบภายในหม้อบด

จากการศึกษาของ Tian et al. (2011) เมื่อทำการบดสารสีขาวโพดด้วย ball-mill พบว่า ปริมาณของเกลียวคู่และผลึกมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของนิติ (2543); Shinji et al. (1998); Sanguanpong et al. (2003); Huang et al. (2008); Cavallini and Franco (2010); Shenghua et al. (2014) ในขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรของรูพรุน เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเฉลี่ยของสารเพิ่มขึ้นภายใต้สภาวะของการบดด้วยความเร็ว 500 รอบ/นาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และพบว่าเกิดรอยแยกและร่องบนพื้นผิวของสารอย่างชัดเจน และช่องว่างบริเวณ

hilum ของสตาร์ชแกรนูลถูกทำลายไปเนื่องจากการหลอมละลายของโครงสร้างผลึก ดังนั้นจะเห็นได้ว่า การบดสตาร์ชด้วย ball-mill ทำให้สตาร์ชมีความพรุนเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับของสตาร์ชเพิ่มขึ้นอีกด้วย (Tian et al., 2011)

การเตรียมสตาร์ชให้มีอนุภาคขนาดเล็กนอกจากการบดด้วย ball-mill เพียงอย่างเดียวแล้ว ยังมีการศึกษาของ Sanguanpong et al. (2003) ที่นำวิธีการย่อยด้วยกรดและย่อยด้วยเอนไซม์มาย่อยสตาร์ชก่อนการนำมาบดด้วย ball-mill อีกด้วย จากการศึกษาดังกล่าว พบว่า การเตรียมสตาร์ชมันสำปะหลังให้มีขนาดอนุภาคเล็กลงนั้นสามารถทำได้โดยการบดด้วย ball-mill และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการบด ควรกำจัดส่วนของอณูฐานภายในสตาร์ชออกไปก่อน ซึ่งการนำสตาร์ชไปย่อยด้วยกรดก่อนเป็นวิธีการกำจัดส่วนของอณูฐานออกไปได้ดีกว่าการนำสตาร์ชไปย่อยด้วยเอนไซม์ แต่อย่างไรก็ตาม การกำจัดส่วนของอณูฐานซึ่งเป็นส่วนที่มีความยืดหยุ่นของสตาร์ชออกไป โครงสร้างภายในจะเปราะ ทำให้การแตกหักเกิดขึ้นได้ง่ายและมีประสิทธิภาพสูง นอกจากนี้การบดด้วย ball-mill เป็นเวลานานยังก่อให้เกิดความร้อน ซึ่งมีส่วนทำให้สตาร์ชเกิดการเจลาติไนซ์ (gelatinization) ได้บางส่วน (Tamaki et al., 1997)

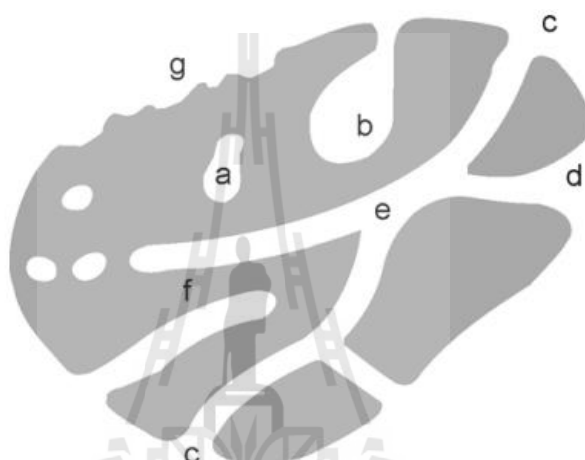
2.4 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวและความพรุน

ความพรุนและพื้นที่ผิวเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัตถุที่เป็นของแข็ง เช่น การกระจายความร้อน การนำความร้อน และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร เป็นต้น (Karathanos and Saravacos, 1993) ความพรุนของของแข็งนั้นสามารถอธิบายได้จากอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของรูพรุนต่อปริมาตรของของแข็ง โดยทั่วไปแล้วรูพรุนถือว่าเป็นพื้นที่ผิวที่เป็นช่องเปิดและมีความลึกเกินครึ่งหนึ่งของช่องเปิดนั้น ตามระบบของ *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC) (Sing et al., 1985) รูพรุนที่เกิดขึ้นสามารถจำแนกออกเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

1. macropores เป็นรูพรุนที่มีความกว้างมากกว่า 50 นาโนเมตร
2. mesopores เป็นรูพรุนที่มีความกว้างระหว่าง 2-50 นาโนเมตร
3. micropores เป็นรูพรุนที่มีความกว้างน้อยกว่า 2 นาโนเมตร

ลักษณะของรูพรุนสามารถจำแนกได้ตามการเข้าถึงของของเหลวจากภายนอก ลักษณะของรูพรุนที่อาจเกิดขึ้นได้แสดงดังภาพที่ 2.8 โดย a เป็นรูที่ไม่มีการเชื่อมต่อกับรูอื่นและไม่มีช่องเปิดสู่พื้นผิวภายนอกหรือเรียกว่า รูปิด (Closed pores) ซึ่งรูชนิดนี้มีผลต่อคุณสมบัติของความหนาแน่น ความยืดหยุ่น ความแข็งแรงเชิงกล และค่าการนำความร้อน แต่ไม่มีผลต่อการไหลของของเหลวและการดูดซับก๊าซ ซึ่งแตกต่างจาก b c d e และ f ซึ่งเป็นรูที่มีช่องเชื่อมกับพื้นผิวภายนอกหรือเรียกว่า รูเปิด (Open pores) รูเปิดนั้นสามารถจำแนกออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ รูกลวงที่ทะลุออกไปยังอีก

ด้านหนึ่ง (through pores) และรูตัน (blind pores) ซึ่งรูกลวงนั้นจะเริ่มจากช่องเปิดด้านหนึ่งแล้ว ทะลวงเข้าไปภายในวัตถุและทะลุออกมาสู่พื้นผิวภายนอกอีกด้านหนึ่ง (c-e-c และ c-e-d) ส่วนรูตัน จะมีเพียงด้านเดียวที่เป็นรูเปิดออกสู่ผิวนอก (b และ f) ส่วน g แสดงลักษณะของพื้นผิวที่ขรุขระ เนื่องจากมีความกว้างมากกว่าความลึก จึงไม่จัดว่าเป็นรู นอกจากนี้รูพรุนยังสามารถแบ่งตาม ลักษณะรูปร่างที่เกิดขึ้นได้อีกด้วย เช่น รูพรุนที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก (cylindrical) รูพรุนที่มี รูปร่างคล้ายขวดน้ำหมึก (ink-bottle) รูพรุนที่มีรูปร่างเป็นทรงกรวย (funnel) รูพรุนที่มีรูปร่างเป็น ลูกบาศก์ (cubic) และรูพรุนที่มีรูปร่างเป็นทรงสามเหลี่ยมพีระมิด (triangular) (Klobes et al., 2006)



ภาพที่ 2.8 แผนภาพตัดขวางลักษณะของรูพรุนที่เป็นของแข็ง

ที่มา: Rouquerol et al., 1994

พื้นที่ผิวจำเพาะเป็นหนึ่งในปัจจัยที่สำคัญที่ใช้อธิบายลักษณะความพรุน และใช้หาพื้นที่ผิว ที่แท้จริงของตัวดูดซับต่อหน่วยมวล (ตารางเมตร/กรัม) ซึ่งเป็นสัดส่วนกันของปริมาตรจำเพาะของ รูพรุนและยังมีความสัมพันธ์ที่แปรผกผันกับความกว้างของรูพรุนอีกด้วย

ในบรรดาวิธีการต่าง ๆ ที่ใช้ในการตรวจสอบความพรุนของสสาร วิธีที่นิยมใช้มากที่สุด คือ การวัดการดูดซับด้วยก๊าซ หรือของเหลว (Monika and Jerzy, 2010) โดยทั่วไปไอโซเทิร์มของ การดูดซับของไนโตรเจน อาร์กอน หรือคริปตอน จะถูกกำหนดไว้ที่อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว และเมื่ออุณหภูมิของแก๊สไนโตรเจนถูกดูดซับจนเต็มพื้นที่ผิวของสสารแล้ว ก็สามารถคำนวณพื้นที่ ผิวจำเพาะของสสารได้จากสมการการดูดซับของแลงมัวร์ (Langmuir, 1916) โดยคำนวณจากการ ดูดซับโมเลกุลของสารถูกดูดซับเพียงชั้นเดียว และสมการของ BET (Brunauer-Emmett-Teller) ซึ่ง พัฒนามาจากแนวความคิดของแลงมัวร์เพื่อการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer adsorption)

- การดูดซับชั้นเดียว (Monolayer adsorption)

เป็นกระบวนการที่สารดูดซับ (adsorbate) ถูกปกคลุมไปด้วยโมเลกุลของสารดูดซับ (adsorbent) เพียงชั้นเดียวที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวราบ ซึ่งสามารถคำนวณปริมาณพื้นที่ผิวได้ด้วยสมการการดูดซับของแลงมัวร์ (Langmuir, 1916) ทั้งนี้ โมเลกุลของสารดูดซับในปริมาณและตำแหน่งที่แน่นอน สารดูดซับจะดูดซับโมเลกุลของสารดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น ค่าความร้อนของการดูดซับจะเท่ากันและคงที่ตลอดพื้นที่ผิวของการดูดซับ นอกจากนี้ยังต้องไม่มีแรงกระทำระหว่างกันสำหรับโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน เมื่อกระบวนการอยู่ในสภาวะสมดุล อัตราการดูดซับจะเท่ากับอัตราการคายสารที่ถูกดูดซับออกจากพื้นผิวของสารดูดซับ จากสมมติฐานดังกล่าวสามารถแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณการดูดซับและความดันของก๊าซที่อุณหภูมิคงที่ได้สมการของแลงมัวร์ ที่แสดงอยู่ในรูปของสมการเส้นตรง ดังต่อไปนี้

$$\frac{1}{W[(\frac{P_0}{P}) - 1]} = \frac{1}{W_m C} + \frac{C - 1}{W_m C} (\frac{P}{P_0})$$

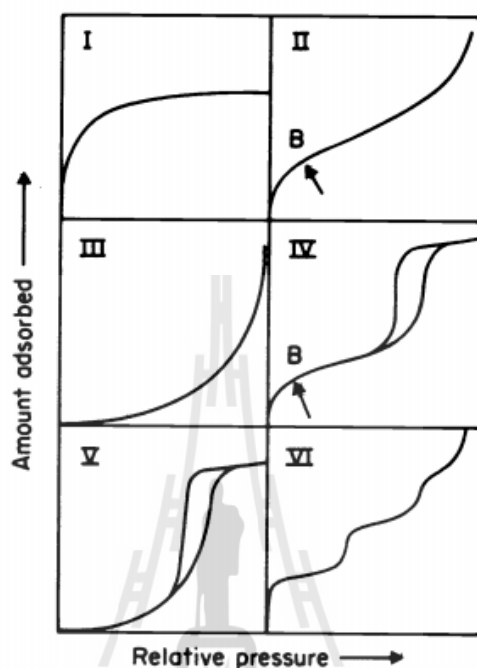
- เมื่อ
- W = ปริมาณของแก๊สที่ถูกดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์ (P/P_0)
 - W_m = ปริมาณของแก๊สในโตรเจนที่ถูกดูดซับเคลือบบนผิวของวัตถุในลักษณะที่เป็นชั้นเดียว (โมลต่อกรัม)
 - P = ความดันของแก๊สในโตรเจนที่ใช้ในขณะทำการทดลอง (หน่วยเป็นมิลลิเมตรปรอท)
 - P_0 = ความดันอิ่มตัวของแก๊สในโตรเจน (หน่วยเป็นมิลลิเมตรปรอท)
 - C = ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กัพลังงานที่ใช้ในการดูดซับ

ปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวอย่าง (S_{BET}) สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$S_{BET} = W_m S_0 [m^2/g]$$

- เมื่อ
- W_m = ปริมาณของแก๊สในโตรเจนที่ถูกดูดซับเคลือบบนผิวของวัตถุในลักษณะที่เป็นชั้นเดียว
 - S_0 = พื้นที่ผิวหน้าตัดของโมเลกุลของแก๊สในโตรเจนที่ถูกดูดซับ (16.2×10^{-23}) (หน่วยเป็นตารางเมตร)

Brunauer et al. (1940) ได้แบ่งประเภทไอโซเทิร์มของการดูดซับออกเป็น 5 แบบ (Type I ถึง Type V) แต่ต่อมา Sing et al. (1985) ได้เสนอไอโซเทิร์มของการดูดซับแบบที่ 6 ขึ้น แสดงดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 ชนิดของไอโซเทิร์มการดูดซับแก๊สที่สภาวะสมดุล

ที่มา: Sing et al., 1985

ชนิดที่ 1 (Type I) เป็นการดูดซับแบบแลงมัวร์ (Langmuir isotherm) ซึ่งเป็นการดูดซับแบบง่ายและพบบ่อยที่สุด การดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับทางเคมีเพียงอย่างเดียว และเป็นการดูดซับโมเลกุลของตัวดูดซับได้เพียงชั้นเดียวอย่างสมบูรณ์ การดูดซับชนิดนี้จะเกิดขึ้นเมื่อขนาดของรูพรุนของตัวดูดซับมีขนาดใหญ่กว่าโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเพียงเล็กน้อย ปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นและเข้าสู่สมดุลอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการดูดซับ หรือในช่วงที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ ๆ การดูดซับลักษณะนี้จะพบได้ในตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็ก

ชนิดที่ 2 (Type II) เป็นการดูดซับทางเคมีและกายภาพ การดูดซับทางเคมีหรือการดูดซับแบบขั้นเดียวจะเกิดขึ้นที่ความดันต่ำ ๆ อย่างสมบูรณ์ จากนั้นจำนวนชั้นของการดูดซับจะเพิ่มขึ้น ณ จุด B เรียกจุดนี้ว่าการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer adsorption) เมื่อความดันสัมพัทธ์มีค่าสูงขึ้น ลักษณะไอโซเทิร์มคล้ายตัว S (S-shaped isotherm) การดูดซับชนิดนี้พบได้ในตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุนหรือมีรูพรุนขนาดใหญ่ และรูพรุนมีการกระจายขนาดในช่วงกว้าง

ชนิดที่ 3 (Type III) เป็นการดูดซับก๊าซที่เกิดการกลั่นตัวเป็นของเหลวขณะเกิดกระบวนการดูดซับ ลักษณะไอโซเทิร์มไม่มีจุดเปลี่ยนกราฟ โมเลกุลของสารถูกจับมีแรงดึงดูดระหว่างกันมากกว่าแรงดึงดูดของตัวดูดซับกับสารถูกดูดซับ แต่เมื่อความดันสัมพัทธ์มีค่าสูงขึ้น ความสามารถในการดูดซับก็จะเพิ่มขึ้น การดูดซับลักษณะนี้จะพบได้ในตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุนหรือมีรูพรุนขนาดใหญ่

ชนิดที่ 4 (Type IV) เป็นการดูดซับก๊าซที่เกิดปรากฏการณ์การควบแน่น และการระเหยของก๊าซที่กลั่นตัวดูดซับที่มีรูปร่างเป็นโพรงขนาดเล็ก ทำให้มีสถานะคล้ายของเหลวและมีแรงดึงดูดเกิดขึ้น ไอโซเทิร์มของการดูดซับแบบนี้เมื่อเข้าสู่ช่วงที่มีการลดความดันเพื่อคายซับ (desorption) และจะมีลักษณะของฮิสเทอรีซิส (hysteresis loop) เกิดขึ้น ในการคายซับจะต้องลดความดันของระบบให้ต่ำกว่าความดันในช่วงของการดูดซับเพื่อเอาชนะแรงดึงดูด ทำให้ไอโซเทิร์มในช่วงการดูดซับและการคายซับปรากฏเส้นที่ไม่ซ้อนทับกัน

ชนิดที่ 5 (Type V) เป็นการดูดซับที่ไม่พบบ่อยมากนัก ลักษณะไอโซเทิร์มจะคล้ายกับชนิดที่ 3 แต่จะมีลักษณะของฮิสเทอรีซิสเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของก๊าซเกิดการควบแน่นในรูพรุน เช่นเดียวกับไอโซเทิร์มการดูดซับชนิดที่ 4 พบได้ทั้งในตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดกลางและขนาดเล็ก

ชนิดที่ 6 (Type VI) เป็นไปไอโซเทิร์มแบบขั้นบันได เกิดจากการดูดซับโมเลกุลของก๊าซบนชั้นผิวการดูดซับแบบขั้นต่อขั้นด้วยแรงที่สม่ำเสมอ

2.5 เดกซ์ทรินต้านทานการย่อย (Resistant Dextrin)

Dextrin เป็นกลุ่มของคาร์โบไฮเดรตที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เนื่องจากผ่านการตัดแปลงโครงสร้างโดยการย่อย (hydrolysis) โมเลกุลของแป้ง โดยใช้เอนไซม์ หรือกรด เป็นตัวกระตุ้นให้เกิดการย่อย ซึ่งจะใช้น้ำเป็นตัวกลาง คือทำให้สารละลายอยู่ในรูปคอลลอยด์ มักเป็นของเหลว หรืออาจเกิดจากการให้ความร้อนสูงร่วมกับกรดทำปฏิกิริยากับแป้งในสถานะแห้ง (dry starch) เพื่อเปลี่ยนให้เป็น dextrin ซึ่งกระบวนการนี้จะเรียกว่า “pyrolysis” (Wurzburg, 1995) Dextrin สามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภทใหญ่ ๆ ได้ดังนี้ 1) maltodextrin ที่ผลิตจากการนำสารละลายแป้งมาย่อยด้วยเอนไซม์ เช่น เอนไซม์กลุ่มอะไมเลส 2) ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการย่อยสารละลายแป้งด้วยกรด 3) cyclodextrin และ 4) pyrodextrin ที่ผลิตจากการนำแป้งไปให้ความร้อนเพียงอย่างเดียว หรือให้ความร้อนร่วมกับกรดในสถานะแห้ง และ pyrodextrins สามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ British gums, white dextrin และ yellow dextrans (BeMiller, 1993; Tomasik et al., 1989; Wurzburg, 1995)

Resistant Dextrin หมายถึง พอลิเมอร์ของกลูโคสสายสั้น ๆ ที่ไม่มีรสหวานและมีความต้านทานต่อเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารของร่างกายมนุษย์ (Chkuma et al., 1999) โดย

โครงสร้างภายในจะจับกันด้วยพันธะ α -1, 2, -1, 3, -1, 6 และ β -glycoside มากกว่าสตาร์ชดิบที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตซึ่งมีโครงสร้างที่จับกันด้วยพันธะ α -1, 4 และ 1, 6 ซึ่งสามารถถูกย่อยได้ด้วยเอนไซม์ในร่างกายของมนุษย์ (Mana, 2003) Resistant Dextrin สามารถผลิตได้โดยใช้วิธี pyroconversion หรือ dextrinization

ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการ dextrinization แบ่งเป็น 3 ประเภท คือ เดกซ์ทรินขาว เดกซ์ทรินเหลือง และบริทิซกัม สภาวะในการผลิตและลักษณะของเดกซ์ทรินทั้ง 3 ประเภท จะแตกต่างกันคือ

- เดกซ์ทรินขาว จะทำการผลิตที่อุณหภูมิต่ำ ประมาณ $95-120^{\circ}\text{C}$ pH ต่ำ เพื่อไม่ให้เกิดการสร้างสีมากเกินไป และได้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถละลายน้ำได้ 0-90% (Hoseney and Lineback, 1996) ลักษณะของเดกซ์ทรินขาวจะคล้ายกับแป้งที่ตัดแปรด้วยกรด แต่ระดับการย่อยสลายพันธะกลูโคซิดิกจะสูงกว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะละลายได้ดีในน้ำเย็น การเตรียมเดกซ์ทรินขาวจะไม่ทำในสภาพที่แป้งอยู่ในรูปของสารแขวนลอย เนื่องจากจะมีการสูญเสียแป้งบางส่วนไปในขณะกรอง แต่จะให้ความร้อนกับแป้งให้สภาวะแห้งโดยมีการคอนนัทรีซ์เป็นตัวช่วยกระตุ้นปฏิกิริยา และทำในภาชนะที่มีการหมุนวนตลอดเวลา เดกซ์ทรินขาวที่ได้จะมีความหนืดต่ำและละลายได้อย่างสมบูรณ์ในน้ำร้อน การใช้งานส่วนใหญ่จะใช้เป็น paste adhesives (Thomas and Atwell, 1999)

- เดกซ์ทรินเหลือง วิธีการเตรียมจะคล้าย ๆ กับเดกซ์ทรินขาวแต่ใช้อุณหภูมิสูงกว่า การผลิตจะกระทำที่อุณหภูมิสูงประมาณ $150-180^{\circ}\text{C}$ pH ต่ำ และได้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถละลายน้ำได้ 95-100% (Hoseney and Lineback, 1996) เมื่อความชื้นลดลงต่ำกว่า 3% จะไม่เกิดการตัดพันธะอีกต่อไป สิ่งที่เกิดขึ้นที่จุดนี้คือ โมเลกุลที่ถูกตัดจะกลับมารวมตัวกัน โดยจัดเรียงโครงสร้างเป็นกึ่งก้าน การสร้างพันธะใหม่จะเป็นแบบสุม คือเกิดได้ทั้งที่ตำแหน่งพันธะกลูโคซิดิก -1, 2 -1, 3 -1, 4 -1, 5 และ -1, 6 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความหนืดต่ำมาก เดกซ์ทรินเหลืองจะไม่เกิดการคิ่นตัวหรือคิ่นตัวน้อยมากแม้ในสภาวะที่มีความเข้มข้นสูง ๆ เนื่องจากกึ่งก้านที่เกิดขึ้นมีขนาดสั้นมากจึงไม่สามารถอุ้มน้ำไว้ภายในโครงสร้างได้ (Thomas and Atwell, 1999)

- บริทิซ กัม จะเตรียมที่อุณหภูมิสูง $170-200^{\circ}\text{C}$ pH สูง ทำให้ได้สีของผลิตภัณฑ์เข้มกว่า เดกซ์ทรินขาว สามารถละลายน้ำได้ 1-100% (Hoseney and Lineback, 1996) ในการผลิตบริทิซ กัม ไม่ต้องการกระบวนการย่อยด้วยกรด จึงมีการเติมสารละลายเบส หรือบัฟเฟอร์ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมฟอสเฟต โซเดียมไบคาร์บอเนต แอมโมเนียมไบคาร์บอเนต ไตรเอทานอลามีน โดยพ่นลงบนแป้งหรือผสมก่อนที่จะให้ความร้อน (Wurzburg, 1986)

ขั้นตอนหลัก ๆ ของการเตรียมเดกซ์ทรินด้านการย่อย ด้วยกระบวนการเดกซ์ทรินใน-เซชัน มี 4 ขั้นตอนที่สำคัญ ดังนี้

1) การเตรียม (pretreatment)

ขั้นตอนแรกเป็นการทำให้แป้งที่ใช้เป็นวัตถุดิบมีสภาพเป็นกรด โดยพ่นสารละลายกรดเจือจาง เช่น กรดไฮโดรคลอริก และสารเคมีอื่นที่ทำหน้าที่เป็น acid donor หรือบัฟเฟอร์ เช่น แอมโมเนียคาร์บอเนต ลงบนแป้งที่มีความชื้นประมาณ 5% หรือมากกว่า ซึ่งในอุตสาหกรรมการผลิตเดกซ์ทรินขาวและเดกซ์ทรินเหลือง จะใช้กรดอินทรีย์ที่สามารถระเหยได้ เช่น กรดไฮโดรคลอริกจะนิยมใช้มากที่สุด ส่วนบริทิช กัม อาจใช้เพียงกรดเล็กน้อยและอาจไม่มีการเติมกรดหรือบัฟเฟอร์ใด ๆ ลงไปเลย

ปริมาณของกรดจะถูกกำหนดด้วยค่า pH ที่ต้องการใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเดกซ์ทรินเฮชันและลักษณะของเดกซ์ทรินต้านทานการย่อยที่ต้องการ นอกจากนี้การผสมกรดหรือบัฟเฟอร์ให้กระจายในแป้งอย่างทั่วถึงเป็นเรื่องที่สำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมที่ผลิตเดกซ์ทรินขาว เดกซ์ทรินเหลือง และบริทิช กัม ที่มีการเตรียมกรดในขั้นตอนการเตรียมแป้ง

ในขณะที่เตรียมแป้งจะกวนด้วยใบพัด เพื่อให้กรดหรือบัฟเฟอร์กระจายในแป้งอย่างทั่วถึง ส่วนปัจจัยที่สำคัญในการผลิตคือ ความชื้นของแป้ง อุปกรณ์ในการพ่น ชนิดของการกวน อุณหภูมิ และเวลาในการผสม การผสมกรดหรือบัฟเฟอร์กับแป้งเป็นจุดสำคัญในการผลิต มิเช่นนั้นอาจการไหม้ในระหว่างการให้ความร้อนอันเนื่องมาจากกรดไฮโดรคลอริก และในการเติมกรดหรือบัฟเฟอร์อาจทำในขณะที่แป้งอยู่ในรูปของสารแขวนลอย แทนการพ่นลงบนแป้งเพราะจะทำให้กรดหรือบัฟเฟอร์กระจายในแป้งได้อย่างทั่วถึง

สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเจือจางนิยมใช้ในการเตรียมแป้งให้อยู่ในสภาวะกรด นอกจากนี้ไฮโดรเจนคลอไรด์ในรูปของก๊าซก็สามารถใช้ได้เช่นกัน เช่น ก๊าซคลอรีน ซึ่งนอกจากจะใช้ในการทำแป้งให้อยู่ในสภาวะกรดแล้ว ยังสามารถเกิดการออกซิเดชันได้เช่นเดียวกับก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ (Wurzburg, 1986)

กรดไฮโดรคลอริกเป็นกรดที่สามารถแตกตัวครั้งเดียวได้อย่างสมบูรณ์ (Monochloroacetic acid) นิยมนำมาใช้เตรียมแป้งให้อยู่ในสภาวะกรด (Bulfer and Gapen, 1942) ที่อุณหภูมิสูง ไฮโดรเจนคลอไรด์จะเกิดการสลายตัวด้วยเหตุนี้ก็เป็นไปได้ที่จะลดการเกิดกรดไฮโดรไลซ์จากกรดไฮโดรคลอริกในช่วงต้นของการทำแห้งเมื่อสภาวะในการทำปฏิกิริยามีความชื้นสูง ซึ่ง Bulfer and Gapen (1942) ได้รายงานว่า การใช้ Monochloroacetic acid ในการผลิตเดกซ์ทรินขาวจะช่วยปรับปรุงความเหนียว การยึดเกาะ และสีของเดกซ์ทรินที่ผลิตได้อีกด้วย

2) การทำแห้ง (predrying)

ขั้นตอนนี้อาจจะมีหรือไม่ก็ได้ขึ้นอยู่กับเดกซ์ทรินที่ต้องการและอุปกรณ์ในการผลิต ความชื้นในแป้งจะช่วยในการเกิดกรดไฮโดรไลซ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระหว่างการให้ความร้อนในสภาวะที่ pH ต่ำ ในการผลิตเดกซ์ทรินเหลือง การ predrying เป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องทำก่อน

กระบวนการเดกซ์ทรีไนเซชัน ซึ่งอาจจะทำโดยการนำแป้งที่อยู่ในสภาวะกรดไปทำให้แห้งอย่างรวดเร็ว โดยการใช้อากาศ หรือให้ความร้อนอย่างช้า ๆ ในระหว่างกระบวนการเดกซ์ทรีไนเซชัน บางครั้งมีการทำแห้งในสภาวะสุญญากาศเพื่อกำจัดความชื้นที่อุณหภูมิต่ำ (Wurzburg, 1986) สำหรับเดกซ์ทรีนขาวจะลดความชื้นเหลือ 5-12% เดกซ์ทรีนเหลืองและบริทิช กัม จะลดความชื้นลงให้ต่ำกว่า 5%

ขั้นตอนการทำแห้ง โดยทั่วไปจะทำแป้งที่อยู่ในสภาวะกรดแล้วให้แห้งบางส่วนก่อนที่จะเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น เพื่อป้องกันการเกิดผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำตาลปนมาสูง อันเนื่องมาจากความชื้นในแป้งที่ช่วยให้เกิดการไฮโดรไลซิสได้ดี ทั้งนี้คุณภาพของเดกซ์ทรีนจะคำนึงถึงปริมาณน้ำตาลที่ปนมา การดูดความชื้น (hygroscopicity) ความเหนียว สี และคุณสมบัติของการไหล

3) การให้ความร้อน (pyroconversion)

ขั้นตอน pyroconversion หรือการให้ความร้อนสูง ทำในหม้อต้ม (vertical หรือ horizontal mounted cooker) ที่มีการกวนและให้ความร้อนโดยตรงจากไอน้ำ หรือหม้อสองชั้นที่ทำให้ร้อนด้วยน้ำมัน (oil-heated jacket) ในการผลิตให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันจำเป็นจะต้องมีการกวนที่ดีเพื่อให้ความร้อนกระจายทั่วถึง ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาควรมีการไหลของอากาศที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดการระบายความชื้นและไอน้ำอย่างรวดเร็ว รวมถึงเป็นการควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสมอีกด้วย

อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตภัณฑ์และอุปกรณ์ โดยอุณหภูมิที่ใช้ในช่วง 100-200°C เวลาในการให้ความร้อนอยู่ในช่วงไม่กี่นาทีจนถึงหลายชั่วโมง โดยทั่วไปเดกซ์ทรีนขาวจะใช้อุณหภูมิต่ำ และเวลาในการให้ความร้อนสั้น เดกซ์ทรีนเหลืองและบริทิช กัม ใช้เวลานานและอุณหภูมิสูง

ความชื้นของเดกซ์ทรีนที่ได้อยู่ในช่วง 0-5% การทำให้แป้งแห้งโดยลดความชื้นจะทำให้เกิดฝุ่นละอองจำนวนมาก จึงต้องมีที่เก็บฝุ่น (dust collection) ในเครื่องทำเดกซ์ทรีน (dextrinizer) (Wurzburg, 1986)

4) การทำให้เย็น (cooling)

เมื่อถึงขั้นสุดท้ายของการทำปฏิกิริยา ซึ่งทราบได้จากการวัดสี ความหนืด และการละลาย อุณหภูมิของเดกซ์ทรีนจะอยู่ในช่วง 100- 200°C หรือสูงกว่า หลังจากนั้นหยุดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วโดยการให้ความเย็น ในบางกรณีเมื่อ pH ของปฏิกิริยาต่ำมาก ๆ จะต้องทำให้ตัวอย่างอยู่ในสภาวะที่เป็นกลางเพื่อป้องกันการดำเนินปฏิกิริยาต่อไประหว่างการทำให้เย็นและการเก็บ การทำให้เป็นกลางนั้นอาจทำได้โดยผสมตัวอย่างกับสารที่เป็นเบส (alkaline reagent) เช่น แอมโมเนียมคาร์บอเนต เกลือฟอสเฟต หรือใช้ก๊าซแอมโมเนีย

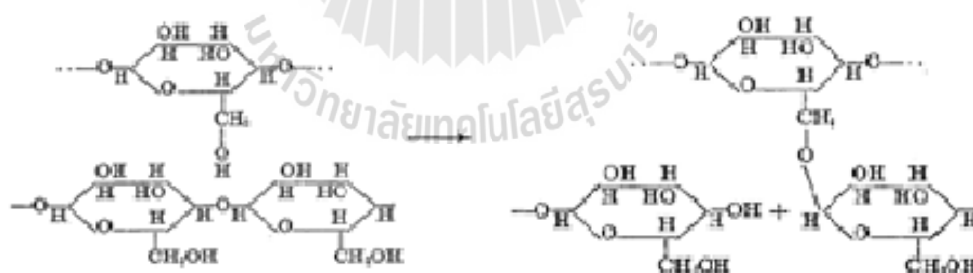
การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของแป้งในระหว่างกระบวนการเดกซ์ทรีไนเซชันเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน โดยเกิดปฏิกิริยาหลัก 3 ปฏิกิริยา ดังนี้

1) การย่อย (hydrolysis)

ภายในโมเลกุลแป้งจะถูกย่อยด้วยกรดในระหว่างกระบวนการทำแห้ง (predrying) และตอนเริ่มต้นของกระบวนการเดกซ์ทรีไนเซชัน ซึ่งจะทำให้เกิดการตัดพันธะของสายกลูโคสที่ตำแหน่ง α -1, 4 หรือ α -1, 6 ในระหว่างนี้น้ำหนักโมเลกุลจะลดลงอย่างต่อเนื่อง ทำให้ความหนืดลดลง และเป็นการเพิ่มหิวรีดิวิชันจากการย่อยพันธะไกลโคซิดิก ในสภาวะที่ pH และความชื้นต่ำจะช่วยให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น

2) การจัดเรียงตัวใหม่ (transglucosidation)

ในช่วงนี้จะมีการทำลายพันธะ α -1, 4 ไกลโคซิดิก และเกิดการรวมตัวกันของหมู่ไฮดรอกซิลอิสระที่แตกออกมา เพื่อผลิตเป็น โครงสร้างของกิ่ง เช่น การเกิดเมทิลเลชันใน corn british gum ซึ่งมี non-reducing end 1 หมู่ ทุก ๆ 12 หน่วยของกลูโคส ซึ่งในแป้งจะมี non-reducing end 1 หมู่ ที่ 24-30 หน่วยของน้ำตาลกลูโคส นอกจากนี้ระดับการย่อยโดยเอนไซม์เบต้า-อะมิเลสจะลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการสร้างพันธะกิ่งขึ้นในระหว่างการทำปฏิกิริยา เนื่องจากเมื่อความร้อนเข้าสู่ส่วนของผลึก พันธะไกลโคซิดิกจะถูกทำลาย ปลายที่อิสระจะเข้ามาเชื่อมกับหมู่ไฮดรอกซิลข้างเคียง โครงสร้างที่เป็นกิ่งจะเพิ่มความสามารถในการละลายน้ำของเดกซ์ทรีน และยังช่วยป้องกันการเกิดการคืนตัว (retrogradation) ได้อีกด้วย (Brimhall, 1944)



ภาพที่ 2.10 กลไกการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุลที่เป็นเส้นตรงของแป้งไปเป็นโมเลกุลที่มีลักษณะเป็นกิ่งก้านในระหว่างการทำความร้อนของกระบวนการเดกซ์ทรีไนเซชัน

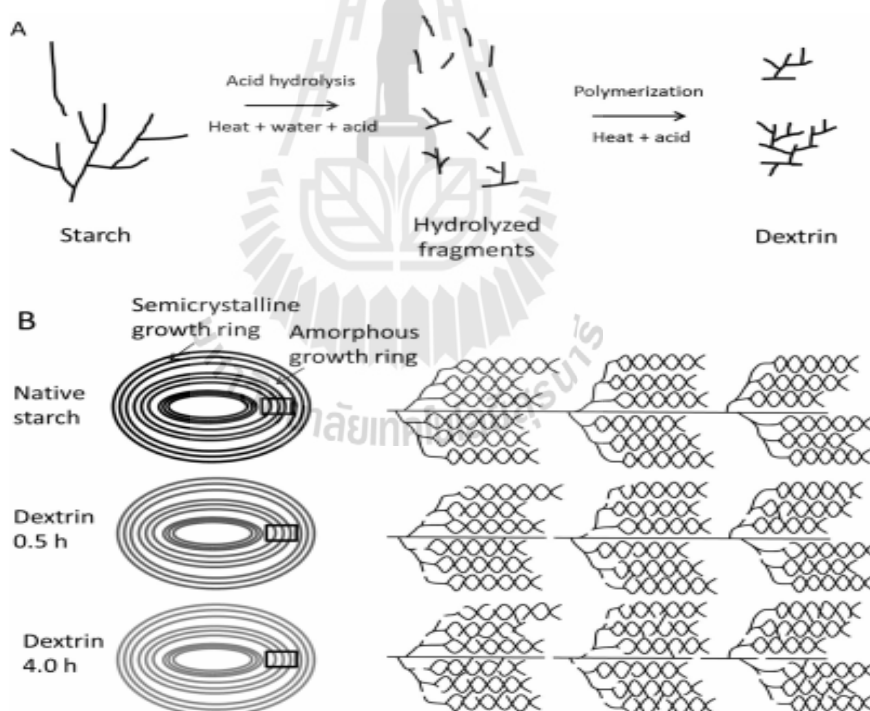
ที่มา: Brimhall, 1944

3) การเกิดพอลิเมอร์ใหม่ (repolymerization)

ปฏิกิริยา polymerization จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง เมื่อมีกรดเป็นตัวเร่งในการเกิดปฏิกิริยาในปฏิกิริยาการทำเดกซ์ทรีนเหลือ่ง พบว่าเกิดพอลิเมอร์ใหม่ของกลูโคสหรือโอลิโก-

แซคคาไรด์ไปเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ ซึ่งสังเกตได้จากน้ำตาลรีดิวซิงที่ลดลงและความหนืดที่เพิ่มขึ้น (Wurzburg, 1986)

เมื่อไม่นานมานี้ Yanjie et al. (2014) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสตาร์ช waxy maize ในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนเพื่อให้สตาร์ชสามารถละลายได้ในน้ำเย็น โดยใช้กระบวนการเดกซ์ทริไนเซชันภายใต้สภาวะที่มีกรดเป็นตัวเร่ง และตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างสตาร์ชโดยใช้หลาย ๆ เทคนิคด้วยกัน รวมถึงการใช้ซินโครตรอน ในการศึกษาได้รายงานว่า ในระหว่างกระบวนการเดกซ์ทริไนเซชันที่ดำเนินไปนั้น แกนกลางของสตาร์ช (starch backbone) ภายในบริเวณออสันฐานจะถูกทำลายไปพร้อม ๆ กับในบริเวณส่วนเปลือก ในระหว่างนี้ปริมาณและขนาดของผลึกจะลดลง และน้ำหนักโมเลกุลของสตาร์ชก็จะลดลงอีกด้วย นอกจากนี้ เมื่อตรวจสอบเม็ดสตาร์ชหลังผ่านกระบวนการเดกซ์ทริไนเซชันภายใต้กล้องโพลาไรซ์ยังพบว่าโมเลกุลของสตาร์ชยังคงจัดเรียงตัวกันในแนวรัศมีและยังปรากฏลักษณะของ birefringence อย่างชัดเจน



ภาพที่ 2.11 การเปลี่ยนแปลงของโมเลกุลสตาร์ชในระหว่างกระบวนการเดกซ์ทริไนเซชัน (A) และแสดงโมเดลของการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของคลัสเตอร์ของสตาร์ชและบางส่วนของบริเวณเปลือกของสตาร์ชดิบ และสตาร์ชหลังผ่านกระบวนการเดกซ์ทริไนเซชันเป็นเวลา 0.5 และ 4 ชั่วโมง (B)

ที่มา: Yanjie et al., 2014

จากภาพที่ 2.11 A แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของสตาร์ชมีการเปลี่ยนแปลงไป เมื่อย่อยด้วยกรดรวมกับการให้ความร้อนสูง โดยโมเลกุลจะกลับมาจับตัวกันใหม่จนกลายเป็นโครงสร้างกิ่ง ส่วนภาพที่ 2.11 B เป็นโมเดลที่อธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างสตาร์ชระหว่างกระบวนการเดกซ์ทรีไนเซชัน โดยใช้เทคนิคหลาย ๆ ด้านร่วมกันคือ กล้องจุลทรรศน์ small-angle X-ray scattering (SAXS), wide-angle X-ray scattering (WAXS), differential scanning calorimetry (DSC) และ gel permeation chromatography (GPC) เมื่อสตาร์ชถูกให้ความร้อนที่ 170°C เป็นเวลา 0.5 ชั่วโมง แกนกลางของสตาร์ชในบริเวณอสัณฐานจะถูกย่อยโดยกรดและขนาดของผลึกจะลดลง โมเลกุลของสตาร์ชจะถูกย่อยให้มีขนาดเล็กลงแต่โครงสร้างยังคงเรียงตัวในแนวรัศมี และชั้นกิ่งผลึกของโครงสร้างยังคงปรากฏอยู่ในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการเดกซ์ทรีไนเซชัน

จากการศึกษาของ Wang et al. (2001) ได้แสดงส่วนที่ไม่ถูกย่อยในองค์ประกอบของเดกซ์ทรีน ซึ่งได้จากการดัดแปรสตาร์ชโดยกระบวนการเดกซ์ทรีไนเซชัน ซึ่งเป็นการผลิตเดกซ์ทรีน โดยย่อยด้วยกรดและให้ความร้อนสูง โดยกรดจะเข้าทำปฏิกิริยากับบริเวณอสัณฐานมากกว่าส่วนที่เป็นผลึก โดยโครงสร้างจะถูกเปลี่ยนให้มีพันธะ α -1, 4 glucosidic อย่างเหมาะสม ซึ่งเดกซ์ทรีนที่ได้แสดงคุณสมบัติที่มีลักษณะเหมือนกับใยอาหาร (dietary fiber) การทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำและใช้เวลานานจะได้เดกซ์ทรีนที่มีสีขาว (white dextrin) แต่ถ้าทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงและความเข้มข้นของกรดสูงจะได้เดกซ์ทรีนที่มีสีเหลือง (yellow dextrin) และถ้าทำปฏิกิริยาที่สภาวะรุนแรงก็จะได้ British gum และมีสีน้ำตาลอ่อน (Wurzburg, 1995; Wang et al., 2001) สีของผลิตภัณฑ์เดกซ์ทรีนที่ปรากฏเกิดจากอิทธิพลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของกรดที่ใช้ในกระบวนการเดกซ์ทรีไนเซชัน (Wurzburg, 1995)

จากผลการศึกษาของ Laurentin et al. (2003) โดยการดัดแปรสตาร์ชมันสำปะหลัง ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 140°C เป็นเวลา 1.5 3 และ 4.5 ชั่วโมง และใช้ HCl ที่ความเข้มข้น 0.99 1.82 และ 2.65 กรัมต่อกิโลกรัมแป้ง แล้ววัดความแตกต่างของสี (Color difference: ΔE) ของเดกซ์ทรีนเมื่อเทียบกับแป้งมันสำปะหลังเริ่มต้น พบว่า การให้ความร้อนโดยใช้เวลานานคือ 1.5 ชั่วโมง จะให้ค่า ΔE ที่น้อยกว่าการให้ความร้อนที่ใช้เวลานาน หรือสีที่เกิดขึ้นมีความแตกต่างจากสีเริ่มต้นน้อย ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Compechano et al. (2007) ได้ทำการศึกษาค่า ΔE ของ Lima bean และ Cowpea โดยใช้กรด HCl แล้วพบว่า การทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำและเวลานานคือ ที่ 100°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะให้ค่า ΔE ที่น้อย

ในอุตสาหกรรม เดกซ์ทรีนด้านทานการย่อยถูกนำมาใช้เป็นสารปรุงแต่งเป็นตัวเชื่อมและเป็นแคปซูล (encapsulation agent) นอกจากนี้แล้ว ยังถูกพบว่าสามารถช่วยกระตุ้นการเจริญเติบโตของ *Bifidobacterium species* ในลำไส้ใหญ่ของมนุษย์ และยังทนต่อการถูกย่อยในบริเวณระบบย่อยอาหารส่วนบนอีกด้วย *Bifidobacterium spp.* เป็นแบคทีเรียประจำถิ่นที่อาศัยอยู่ใน

ลำไส้ใหญ่ และจะแพร่พันธุ์ได้ดีหากมีอาหารที่เหมาะสม โดยมันจะย่อยอาหารเหล่านั้นมาใช้ในการเจริญเติบโต ซึ่งมันสามารถปรับสิ่งแวดล้อมที่มันอยู่ให้มีสภาวะไม่เหมาะสมต่อการเจริญของพวกจุลินทรีย์ก่อโรค (pathogen) ได้ ซึ่งเซลล์ทรินด้านทานการย่อยไม่สามารถถูกย่อยได้ง่ายโดยเอนไซม์ในร่างกายมนุษย์ ซึ่งมีคุณสมบัติเช่นเดียวกับใยอาหาร ดังนั้นจึงอยู่รอดไปถึงบริเวณลำไส้ใหญ่ และถูกย่อยเป็นอาหารสำหรับ *Bifidobacterium spp.* ในส่วนนี้ (Katarzyna et al., 2012)

2.6 ใยอาหาร

ใยอาหารและธาตุพืชต่าง ๆ มีการผสมผสานเอกลักษณ์ของการออกฤทธิ์ทางชีวภาพ รวมถึงแบ่งด้านทาน วิตามิน แร่ธาตุ ไฟโตเคมีคอล หรือสารพฤกษเคมี และสารต้านอนุมูลอิสระ เป็นผลให้มียานวิจัยจำนวนมาก สนใจทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณประโยชน์ของสารเหล่านี้ ซึ่งมีการศึกษาทางการแพทย์และระบาดวิทยาที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับการได้รับใยอาหารและธาตุพืช เข้าไปในร่างกายได้ระบุว่า สารเหล่านี้มีผลเกี่ยวกับการลดลงของการเกิดโรคอ้วน โรคเบาหวานชนิดที่สอง โรคกระเพาะ และโรคหลอดเลือดหัวใจ (Cardiovascular disease; CVD) (Katarzyna et al., 2012)

คาร์โบไฮเดรตสามารถจำแนกออกเป็น 2 กลุ่ม ตามความสามารถในการของระบบย่อยอาหารในร่างกาย คือ กลุ่มที่หนึ่ง เป็นกลุ่มที่สามารถย่อยได้ง่ายโดยเอนไซม์ในร่างกายและดูดซึมที่ลำไส้เล็ก เช่น สตาร์ช น้ำตาล และ ฟรุคเตน เป็นต้น และกลุ่มที่สอง เป็นกลุ่มที่ต้านทานต่อการย่อยในลำไส้เล็กและเป็นที่ต้องการในกระบวนการหมักของจุลินทรีย์ในลำไส้ใหญ่ คาร์โบไฮเดรตกลุ่มนี้เป็นพวกที่มีโครงสร้างซับซ้อน สามารถพบได้ในเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน

เมื่อไม่นานมานี้ AACC (American Association of Cereal Chemists) ได้ให้คำจำกัดความของใยอาหารว่า “เป็นคาร์โบไฮเดรตที่มีระดับการเชื่อมต่อน้ำตาลมากกว่า 3 หน่วยขึ้นไป และไม่ถูกย่อยหรือถูกดูดซึมที่ลำไส้เล็ก” นอกจากนี้ WHO (The World Health Organization) และ FAO (Food and Agriculture Organization) ก็มีความเห็นสอดคล้องกับคำจำกัดความของ AACC แต่มีการปรับเปลี่ยนเล็กน้อย คือ ใยอาหารเป็นโพลีแซคคาไรด์ที่มีหน่วยโมโนเมอร์เท่ากับหรือมากกว่า 10 หน่วย และต้องไม่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ที่อยู่ในลำไส้เล็ก

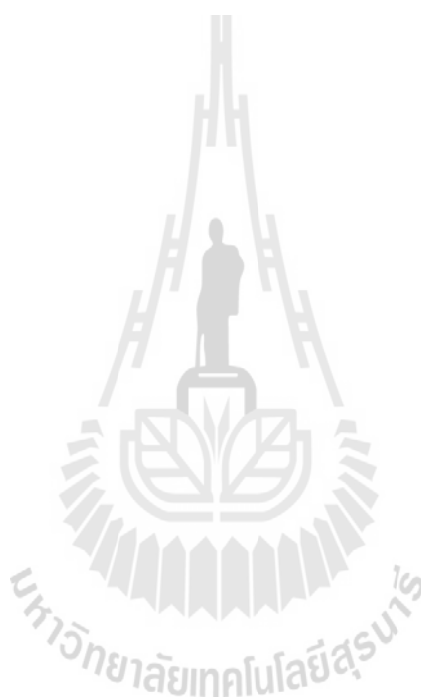
ใยอาหารสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ เส้นใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ (insoluble dietary fiber) จะมีการพองตัวเมื่ออยู่ในน้ำ จึงเป็นการเพิ่มปริมาตรภายในกระเพาะอาหารทำให้รู้สึกอิ่ม และไม่ถูกย่อยโดยน้ำย่อยจากตับอ่อนภายในร่างกายมนุษย์ จึงเหลือรอดผ่านไปสู่ลำไส้ใหญ่ ช่วยเพิ่มปริมาณอุจจาระ ลดปัญหาท้องผูกและความเสี่ยงของโรคกระเพาะลำไส้ได้ ส่วนใยอาหารอีกประเภทหนึ่งคือ ใยอาหารที่สามารถละลายน้ำได้ (soluble dietary fiber) เส้นใยบางชนิดเมื่อละลายน้ำแล้วจะดูดซับน้ำไว้ในโครงสร้าง ทำให้มีความหนืดเพิ่มขึ้น และบางชนิดมีโครงสร้างขนาดเล็กหรือมีความยาวของโพลีเมอร์ไม่เพียงพอที่จะอุ้มน้ำไว้ในโมเลกุลทำให้ใยอาหารประเภทนี้มีความ

ชนิดต่ำ เช่น เดกซ์ทรินด้านทานการย่อย และมอลโตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย (เป็นเดกซ์ทรินที่ผลิตโดยนำสตาร์ชไปผ่านกระบวนการเดกซ์ทรีโนเซชันก่อน จากนั้นนำไปย่อยด้วยเอนไซม์ในกลุ่มของ amylolysis) (Katarzyna et al., 2012) เส้นใยประเภทนี้จะไม่ถูกย่อยโดยเอนไซม์แต่จะถูกหมักและเป็นอาหารให้กับจุลินทรีย์ภายในลำไส้ใหญ่ แบคทีเรียจะทำการหมักใยอาหาร และทำให้เกิดกรดไขมันสายสั้นขึ้น จากนั้นจะถูกดูดซึมผ่านเยื่อผนังของลำไส้ใหญ่ และเมื่อเข้าไปอยู่ในเยื่อบุแล้วก็จะถูกใช้เป็นพลังงาน ซึ่งกรดไขมันสายสั้นจะมีประโยชน์ดังนี้ ช่วยลด pH ในลำไส้ ลดปริมาณแอมโมเนียและยูเรีย ช่วยส่งเสริมการดูดซึมน้ำและโซเดียมซึ่งมีประโยชน์ในผู้ป่วยท้องเสีย ช่วยควบคุมการเคลื่อนไหวของกระเพาะและลำไส้ ช่วยกระตุ้นการเจริญเติบโตของเซลล์เยื่อบุผิวของลำไส้ใหญ่ กรดไขมัน butyrate ช่วยป้องกันการเป็นมะเร็งของลำไส้ใหญ่ ช่วยในขบวนการเมตาโบลิซึมของกลูโคสและไขมัน ทั้งนี้มาจากผลของการสลายกรด acetate และ propionate ทั้งในระดับและในเนื้อเยื่ออื่น ๆ และช่วยทำให้เกิดความสมดุลของแบคทีเรียในลำไส้ (ประสงค์, 2549)

ในปัจจุบันการวิเคราะห์ปริมาณใยอาหาร มีการพัฒนาการวิเคราะห์จากวิธีการดั้งเดิมที่มีการใช้เอนไซม์ในการย่อยตัวอย่างและวิธีการชั่งน้ำหนักเพียงอย่างเดียวเท่านั้นซึ่งวิธีการนี้ไม่สามารถวิเคราะห์ปริมาณใยอาหารที่ละลายน้ำได้อย่างถูกต้อง เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาใหม่ เช่น เดกซ์ทรินด้านทานการย่อย และมอลโตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยนั้น มีโครงสร้างของโมเลกุลขนาดเล็ก เมื่อใช้วิธีดั้งเดิมจึงไม่สามารถวิเคราะห์ในส่วนของโมเลกุลขนาดเล็กได้ ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาการวิเคราะห์ปริมาณใยอาหารที่ใช้วิธีดั้งเดิมรวมกับการวิเคราะห์โมเลกุลขนาดเล็กด้วยการใช้ High Performance Liquid Chromatography (HPLC) (AOAC 2009.01 and 2011.25) การวิเคราะห์นี้สามารถใช้ได้กับตัวอย่างที่มีใยอาหาร รวมถึงตัวอย่างที่มีแป้งด้านทาน และสารโอลิโกแซคคาไรด์ที่ไม่ถูกย่อย (non-digestible oligosaccharides; NDO) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นใยอาหารที่สามารถละลายน้ำได้และมีมวลโมเลกุลต่ำ (low molecular weight soluble dietary fiber) ตัวอย่างที่สามารถวิเคราะห์หาปริมาณใยอาหารทั้งหมดด้วยวิธีนี้ได้ เช่น ธัญพืช ผักและผลไม้ ผลิตภัณฑ์จากธัญพืชและผลไม้ รวมถึงผลิตภัณฑ์อาหารต่าง ๆ เป็นต้น

ปัจจุบันเดกซ์ทรินด้านทานที่มีขายในเชิงพาณิชย์ ได้แก่ Nutriose และ Fibersol ซึ่ง Nutriose ผลิตมาจากแป้งสาลี หรือแป้งข้าวโพด โดยคัดแปรด้วยกระบวนการเดกซ์ทรีโนเซชัน และตามด้วยกระบวนการ Chromatographic fractionation ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีวัตถุประสงค์ในการแยกส่วนที่สามารถต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ได้ออกมา (Fouache et al., 2003) เมื่อบริโภคผลิตภัณฑ์ Nutriose แล้วจะได้พลังงานน้อยกว่าสตาร์ชประมาณ 42% (Vermorel et al., 2004) เนื่องจากผลของกระบวนการเดกซ์ทรีโนเซชันที่ทำให้โครงสร้างของสตาร์ชมีการจัดพันธะใหม่ โดยเกิดเป็นพันธะกลูโคซิดิกที่ตำแหน่ง 1, 2 และ 1, 3 นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มปริมาณของการจับกันของพันธะกลูโคซิดิกที่ตำแหน่ง 1, 6 อีกด้วย ส่วน Fibersol นั้นมีโครงสร้างและการจัดพันธะใหม่คล้ายกับ

Nutriose แต่กระบวนการผลิตจะแตกต่างกัน โดย Fibersol จะประกอบด้วย 2 ขั้นตอนที่สำคัญ คือ ขั้นแรกจะเป็นการนำแป้งข้าวโพดไปผ่านกระบวนการเดกซ์ทรีไนเซชันก่อน จากนั้นมาด้วย เอนไซม์ในกลุ่ม amylolytic อีกครั้งหนึ่ง (Ohkuma et al., 1994) ซึ่งเดกซ์ทรีไนเดชันทั้ง 2 ชนิดนี้ แสดงคุณสมบัติต่อร่างกายหลายประการเช่นเดียวกับใยอาหาร เช่น ป้องกันอาการท้องผูก ช่วยลดระดับน้ำตาลในเลือด ช่วยเพิ่มการดูดซับและเก็บรักษาแมกนีเซียมและแคลเซียม กระตุ้น การผลิตกรดไขมันสายสั้น และช่วยลดระดับของไตรกลีเซอไรด์ (Kamila et al., 2011)



บทที่ 3

วัตถุดิบและวิธีการทดลอง

3.1 วัตถุดิบ

แป้งมันสำปะหลัง (บริษัท เซวานดี สตาร์ช 2004 จำกัด ด้านขุนทด นครราชสีมา) เอนไซม์ แอลฟาอะมิเลส (α -amylase) (EC 3.2.1.1) ที่ผลิตจากเชื้อ *Bacillus licheniformis* (Sigma-Aldrich, USA) และเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (amylglucosidase) (EC 3.2.1.3) ที่ผลิตจากเชื้อ *Aspergillus niger* (Sigma-Aldrich, USA) และสารเคมีต่าง ๆ เกรดสำหรับการวิเคราะห์

3.2 การตัดแปรพื้นผิวสตาร์ช

3.2.1 การตัดแปรพื้นผิวสตาร์ชโดยการใช้เอนไซม์

การตัดแปรพื้นผิวสตาร์ชโดยการย่อยสตาร์ชด้วยเอนไซม์แบบเดี่ยวและแบบผสม คัดแปลงตามวิธีของ Sanguanpong et al. (2003) ซึ่งการย่อยสตาร์ชโดยเอนไซม์แบบเดี่ยว คือย่อยสตาร์ชโดยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส หรือเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเพียงอย่างเดียว และการย่อยสตาร์ชโดยเอนไซม์แบบผสม คือ การย่อยสตาร์ชด้วยเอนไซม์ผสมระหว่างเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสและเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสร่วมกัน โดยเตรียมสตาร์ชมันสำปะหลังความเข้มข้น 30% w/w ในโซเดียมอะซิเตตบัฟเฟอร์ (pH 4.5) จากนั้นย่อยสตาร์ชโดยการเติมเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (EC 3.2.1.1) ที่ผลิตจากเชื้อ *Bacillus licheniformis* (เตรียมให้มีกิจกรรมของเอนไซม์ 120 Unit/ml) เพียงอย่างเดียว หรือย่อยสตาร์ชด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (EC 3.2.1.3) ที่ผลิตจากเชื้อ *Aspergillus niger* (เตรียมให้มีกิจกรรมของเอนไซม์ 300 Unit/ml) เพียงอย่างเดียว และย่อยสตาร์ชด้วยเอนไซม์ผสมระหว่างเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสและเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส ที่เตรียมให้มีกิจกรรมของเอนไซม์ 120 Unit/ml และ 300 Unit/ml ตามลำดับ โดยใช้ความเข้มข้นของแต่ละเอนไซม์ 3% w/w โดยน้ำหนักสตาร์ชแห้ง จากนั้นนำสารละลายสตาร์ชไปต้มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 55°C และเขย่าที่ 180 รอบ/นาที ตลอดเวลา เป็นเวลา 0-6 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างทุก ๆ ชั่วโมง นำสารละลายตัวอย่างไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 1500xg และนำส่วนใสไปวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดด้วยวิธี phenol-sulfuric acid (Dubois et al., 1956) หลังจากนั้นหยุดปฏิกิริยาด้วย 2.2 M HCl ให้ได้ pH ประมาณ 1.5-1.6 เป็นเวลา 10 นาที กรองและล้างตัวอย่างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งสารละลายตัวอย่างมี pH 6.5 นำไปทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิเข้า 160°C อุณหภูมิออก 50-

60°C ที่ความเข้มข้นของสตาร์ช 10% w/w ซึ่งดัดแปลงตามวิธีของ Atichokudomchai et al. (2000) เก็บตัวอย่างในภาชนะปิดสนิทที่อุณหภูมิห้อง เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ ต่อไป

3.2.2 การดัดแปรพื้นผิวสตาร์ช โดยการใช้กรด

การดัดแปรพื้นผิวสตาร์ชด้วยกรด ทำการเตรียมโดยดัดแปลงตามวิธีของ Sanguanpong et al. (2003) โดยเตรียมสตาร์ชมันสำปะหลังความเข้มข้น 30% w/w ใน สารละลาย HCl 2.2 M บ่มในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 55°C และเขย่าที่ 180 รอบ/นาที ตลอดเวลาเป็นเวลา 0-6 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างทุก ๆ ชั่วโมง นำมาวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด เช่นเดียวกับข้อ 3.2.1 เมื่อครบ 6 ชั่วโมง กรองเอาสารละลายกรดออกจากตัวอย่าง ล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งสารละลายตัวอย่างมี pH 6.5 และนำไปทำแห้งแบบพ่นฝอยและเก็บตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องเพื่อนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ เช่นเดียวกับข้อ 3.2.1

3.2.3 การดัดแปรพื้นผิวสตาร์ชโดยการใช้กรดแล้วบดด้วย Ball-mill

การดัดแปรพื้นผิวสตาร์ชโดยใช้ Ball-mill ดัดแปลงตามวิธีของ Sanguanpong et al. (2003) โดยนำตัวอย่างสตาร์ชที่ขยี้ด้วยกรดเป็นเวลา 6 ชั่วโมง มาบดต่อด้วย ball-mill โดยเตรียมสตาร์ชใน absolute ethyl alcohol ความเข้มข้นสตาร์ช 25% w/v ใส่ลงในหม้อบดขนาด 1 กิโลกรัม และบรรจุลูกบอลเซรามิก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร ลงไปใน 50% ของปริมาตรหม้อบด เพื่อใช้บด เติมน้ำโดยเครื่องจะมีความเร็วรอบ 56 รอบ/นาที เป็นเวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง หลังจากครบเวลานำไปตัวอย่างไปทำแห้งที่อุณหภูมิห้อง เก็บตัวอย่างในภาชนะปิดสนิทที่อุณหภูมิห้อง เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ ต่อไป

3.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ

3.3.1 การวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างและพื้นผิวของสตาร์ชก่อนและหลังดัดแปรพื้นผิว

ตรวจสอบลักษณะรูปร่างและพื้นผิวของสตาร์ชก่อนและหลังดัดแปรพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยายสูง (Field Emission Scanning electron microscopy; FE-SEM) (JSM 7800F, JEOL LTD., USA) ที่กำลังขยาย 1,000 6,000 และ 30,000 เท่า เตรียมตัวอย่างโดยติดกาวสองหน้าลงบนด้านหนึ่งของ stub ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร โรยตัวอย่างบาง ๆ ลงบน stub แล้วฉาบทองด้วยเครื่อง sputter coater (JEOL Smart Coater, JEOL LTD., USA)

3.3.2 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางผลึก ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD)

ตรวจสอบรูปแบบผลึกและปริมาณผลึกของสตาร์ชก่อนและหลังการดัดแปรพื้นผิว ด้วยเครื่อง X-ray diffraction (Bruker D2 PHASER, Bruker Corporation, Germany) ที่ใช้ $\text{CuK}\alpha 1$ เป็นแหล่งให้กำเนิดรังสีเอกซ์ วัดในช่วงมุม (2 θ) 5-35 องศา โดยกำหนดกระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมแปร์

ศักย์ไฟฟ้า 30 กิโลโวลต์ step size 0.2 องศาต่อหน้า Alignment 0.02 องศา จำนวนปริมาณผลึก (relative crystallinity, (%)) โดยใช้ซอฟต์แวร์ TOPAS version 4.2 (Bruker Corporation, Germany)

3.3.3 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคเฉลี่ย

วิเคราะห์ค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคเฉลี่ย (D_{50}) สตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังตัดแปรรูปด้วยเครื่อง Diffraction Particle Size Analyzer (HORIBA LA-950, HORIBA Ltd., Japan) อาศัยหลักการเลี้ยวเบนของแสง โดยใช้เลเซอร์ชนิดแก๊สฮีเลียม-นีออน (He-Ne gas laser) เป็นแหล่งกำเนิดแสง ทดสอบแบบเปียก โดยกระจายตัวอย่างลงในเครื่อง ซึ่งบรรจุน้ำกลั่นไว้ เปิดระบบ ultrasonic เพื่อช่วยกระจายตัวอย่าง ระบุค่าดัชนีหักเหของสารที่ใช้กระจายตัวอย่าง โดยน้ำกลั่นมีค่าดัชนีหักเห 1.33 (Horiba Guidebook)

3.3.4 การวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุนเฉลี่ย

วิเคราะห์โดยใช้หลักการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196°C ด้วยเครื่องวัดพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดของรูพรุน (BELSORP-mini II, BEL JAPAN, INC., Japan) จากนั้นนำข้อมูลไอโซเทิร์มการดูดซับที่ได้มาคำนวณเพื่อหาค่าของพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุนเฉลี่ยโดยใช้ทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ขั้นตอนในการวิเคราะห์จะประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ๆ คือ การไล่แก๊สและสิ่งเจือปนออกจากพื้นผิวของตัวอย่าง จากนั้นนำตัวอย่างเข้าสู่ขั้นตอนการวัดการดูดซับแก๊ส โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้ ซึ่งหลอดบรรจุตัวอย่างและอุปกรณ์ประกอบที่อบไล่ความชื้นแล้ว และจดน้ำหนักที่แน่นอน บรรจุตัวอย่าง ประมาณ 0.27-0.28 กรัม ลงในหลอดบรรจุตัวอย่างและใส่อุปกรณ์ประกอบแล้วชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำหลอดที่บรรจุตัวอย่างเข้าเครื่องไล่แก๊ส โดยไล่แก๊สที่อุณหภูมิ 125°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อไล่แก๊สเสร็จแล้ว ชั่งน้ำหนักหลอดที่บรรจุตัวอย่างหลังไล่แก๊ส บันทึกน้ำหนักตัวอย่างที่เหลือหลังจากการไล่แก๊สลงในโปรแกรม ตั้งค่าสถานะที่ใช้ในการวิเคราะห์ให้เหมาะสมกับตัวอย่าง ติดตั้งหลอดบรรจุตัวอย่างเข้ากับเครื่องวิเคราะห์ ใส่ไนโตรเจนเหลวปริมาตร 2 ลิตร ลงในเครื่อง จากนั้นจึงเริ่มวิเคราะห์ตัวอย่าง โดยกำหนดค่าความดันสัมพัทธ์สูงสุด 0.98 หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการวิเคราะห์ ระบบจะทำการบันทึกข้อมูลต่าง ๆ ของตัวอย่าง รวมถึงข้อมูลไอโซเทิร์มการดูดซับแก๊สไนโตรเจน จากนั้นนำข้อมูลที่ได้อ้อมาคำนวณค่าที่ต้องการด้วยซอฟต์แวร์ (BEL MASTERTM, BEL JAPAN, INC., Japan) ต่อไป

3.3.5 สีของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบและสตาร์ชตัดแปรรูปพื้นผิว

วัดสีของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบและสตาร์ชตัดแปรรูปพื้นผิวด้วยเครื่อง Hunter colorimeter (MiniScan EZ 4500L, HunterLab, USA) โดยแปลผลออกมาในระบบ CIE (Commission International de l'Eclairage) โดยวัดค่า L^* , a^* และ b^* เมื่อ $L^* = 0$ มีสีดำ และ $L^* = 100$ มีสีขาว $a^* = -a^*$ มีสีเขียว และ $a^* = +a^*$ มีสีแดง $b^* = -b^*$ มีสีน้ำเงิน และ $b^* = +b^*$ มีสีเหลือง จากนั้นคำนวณค่าความขาวตามสมการ

$$\text{ค่าความขาว (Whiteness)} = 100 - [(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}]^{1/2}$$

3.3.6 ค่าสมมูลเดกซ์โทรส Dextrose equivalent (DE)

วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซิงด้วยวิธี Dinitrosalicylic method (DNS method) ตามวิธีของ Miller (1959) โดยชั่งตัวอย่าง 50 มิลลิกรัม ลงในหลอดทดลองขนาด 10 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 1 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นปริมาตร 4 มิลลิลิตร ลงไปในตัวอย่าง นำไปต้มที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำสารละลายตัวอย่างตัวอย่างปริมาตร 500 ไมโครลิตร ใส่ในหลอดทดลอง จากนั้นเติม DNS ปริมาตร 500 ไมโครลิตร เขย่าให้เข้ากัน นำไปต้มให้เดือด 15 นาที เติมน้ำกลั่นปริมาตร 4 มิลลิลิตร จากนั้น นำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ 540 nm ทำ Standard curve โดยใช้สารละลายกลูโคสที่มีความเข้มข้น (0.2-1 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร)

$$DE = \frac{(A \times 100)}{\% \text{solid}}$$

เมื่อ A คือ % reducing sugar ที่คำนวณจาก standard curve

3.4 การเตรียมเดกซ์ทรินต้านทานการย่อย (Resistant Dextrin)

ดัดแปลงตามวิธีของ Laurentin et al. (2003); Mc Clain (2009) และ Campechano et al. (2007) โดยใช้กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 2.2 M ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร แล้วผสมกับสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ และสตาร์ชที่ดัดแปรพื้นผิวที่เตรียมได้จาก ข้อ 3.2.1-3.2.3 ที่ความชื้น 4-6% จำนวน 22 กรัม เก็บในภาชนะปิดสนิทแล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 16 ชั่วโมง จากนั้นนำไปให้ความร้อนในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 90 นาที ทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ ต่อไป

3.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของเดกซ์ทรินต้านทานการย่อย

3.5.1 ลักษณะรูปร่างและพื้นผิวของเดกซ์ทรินต้านทานการย่อย

ตรวจสอบลักษณะรูปร่างและพื้นผิวของสตาร์ชก่อนและหลังดัดแปรพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยายสูง (Field Emission Scanning electron microscopy; FE-SEM) (JSM 7800F, JEOL LTD., Japan) ที่กำลังขยาย 1,000 และ 6,000 เท่า โดยเตรียมตัวอย่างเช่นเดียวกับข้อ 3.3.1

3.5.2 ลักษณะโครงสร้างและปริมาณผลึกของเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย

ใช้วิธีการเดียวกับ ข้อ 3.3.2

3.5.3 สีของเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย

ใช้วิธีการเดียวกับ ข้อ 3.3.5

3.5.4 ค่าสมมูลเดกซ์โทรส Dextrose equivalent (DE)

ใช้วิธีการเดียวกับ ข้อ 3.3.6

3.5.5 การวิเคราะห์ความสามารถในการละลายน้ำ

วิเคราะห์ความสามารถในการละลายน้ำโดยดัดแปลงตามวิธีการของ Schoch, (1964) โดยละลายเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยความเข้มข้น 10% w/v ในน้ำที่อุณหภูมิห้อง โดยเขย่าที่ 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3000 g เป็นเวลา 15 นาที นำของเหลวที่ได้ไปทำแห้งในตู้อบลมร้อนอุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง และ 130°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักที่แน่นอน แล้วคำนวณความสามารถในการละลายน้ำดังนี้

$$\text{การละลาย (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักแห้งของตัวอย่างหลังอบ}}{\text{น้ำหนักของตัวอย่างเริ่มต้น}} \times 100$$

3.5.6 การวิเคราะห์ปริมาณใยอาหารทั้งหมด (Total Dietary Fiber; TDF)

การวิเคราะห์ปริมาณใยอาหารทั้งหมด วิเคราะห์ตามวิธีของ AOAC 2011.25 โดยชั่งตัวอย่าง 1.000 ± 0.005 กรัม ลงในขวดย่อยตัวอย่างขนาด 250 มิลลิลิตร บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน (ทำ 2 ซ้ำ) จากนั้นทำตัวอย่างให้เปื่อยโดยเติมแอลกอฮอล์ 95% ปริมาตร 1 มิลลิลิตรลงไปในตัวอย่าง แล้วเติมมาลิเอท บัฟเฟอร์ (ความเข้มข้น 50 มิลลิโมลาร์ pH 6.0 ที่ประกอบด้วย 2 มิลลิโมลาร์ แคลเซียมคลอไรด์ และ 0.02% โซเดียมเฮกซะไดรอสเฟต) ปริมาตร 40 มิลลิลิตร ที่ประกอบด้วยเอนไซม์ แพนครีเอติก แอลฟาอะไมเลส (Pancreatic α-amylase; PPA) โดยเตรียมให้มีกิจกรรมของเอนไซม์ 50 ยูนิต/มิลลิลิตร และเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดส (Amyloglucosidase; AMG) โดยเตรียมให้มีกิจกรรมของเอนไซม์ 3.4 ยูนิต/มิลลิลิตร ลงในขวดย่อยตัวอย่างแต่ละขวด ปิดฝาแล้วนำไปต้มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 37°C และเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบ/นาที เป็นเวลา 16 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาแล้วนำตัวอย่างมาปรับ pH ให้เป็น 8.2 (7.9-8.4) โดยเติมด้วย Trizma® base ความเข้มข้น 0.75 โมลาร์ ปริมาตร 30 มิลลิลิตร แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95-100°C ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ โดยไม่ต้องเขย่าเป็นเวลา 20 นาที เพื่อหยุดปฏิกิริยาของเอนไซม์ หลังจากครบเวลาแล้ว นำตัวอย่างมาลดอุณหภูมิให้เหลือประมาณ 60°C แล้วเติมเอนไซม์โปรติเอส (protease) (50 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร; 350 Tyrosine ยูนิต/มิลลิลิตร) ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ลงไปในแต่ละตัวอย่าง แล้วนำไปต้มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 60°C เป็นเวลา 30 นาที เมื่อครบเวลา นำตัวอย่างออกมาเติมกรดอะซิ-

ดิก ความเข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาตร 4 มิลลิลิตร เพื่อปรับ pH ให้ได้ประมาณ 4.3 แล้วเติม D-sorbital internal standard ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงไปในแต่ละตัวอย่าง ทั้งนี้เตรียม blank 2 ซ้ำ เช่นเดียวกับตัวอย่าง

เมื่อย่อยตัวอย่างด้วยเอนไซม์เรียบร้อยแล้ว นำมากรองผ่าน crucible ที่เตรียมไว้เพื่อกรองส่วนของใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ (Insoluble Dietary fiber; IDF) และแป้งต้านทาน (Resistant Starch; RS) ไว้ใน crucible (นำ crucible ขนาด 50 มิลลิลิตร บรรจุ Celite 1 กรัม ออบในตู้อบลมร้อนจนมีน้ำหนักที่แน่นอน แล้วบันทึกน้ำหนักที่แน่นอนไว้) โดยกระจาย Celite ให้ทั่ว crucible ที่ต่อเข้ากับชุดกรองและปั๊มสุญญากาศ ด้วยแอลกอฮอล์ 78% ปริมาตร 15 มิลลิลิตร จากนั้นค่อย ๆ เทตัวอย่างลงไปใน crucible แล้วกลั้วขวดย่อยตัวอย่างด้วยน้ำปราศจากไอออนอุณหภูมิ 60°C ประมาณ 10 มิลลิลิตร แล้วใช้ spatula กวาดเอาตัวอย่างที่ติดอยู่ภายในขวดย่อยออกให้หมด จากนั้นกลั้วขวดย่อยด้วยน้ำปราศจากไอออนอุณหภูมิ 60°C ประมาณ 10 มิลลิลิตร อีกครั้ง แล้วเก็บสารละลายตัวอย่างที่ผ่านการกรองมาปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนให้มีปริมาตร 70 มิลลิลิตร แล้ววิเคราะห์หาปริมาณใยอาหารที่ละลายน้ำได้แต่ตกตะกอนใน 78% แอลกอฮอล์ (dietary fiber soluble in water but precipitated in 78% aqueous ethanol; SDFP) และใยอาหารที่ละลายน้ำได้แต่ไม่ตกตะกอนใน 78% แอลกอฮอล์ (dietary fiber soluble in water and not precipitated in 78% aqueous ethanol; SDFS) โดยนำสารละลายตัวอย่างที่ผ่านการกรองและปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน ปริมาตร 70 มิลลิลิตรแล้ว มาให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 60°C แล้วเติมแอลกอฮอล์ 95% ที่มีอุณหภูมิ 60°C ปริมาตร 280 มิลลิลิตร ลงไปตัวอย่าง แล้วเขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 60 นาที จากนั้นนำมากรองผ่าน crucible เดิม ที่มีส่วนของใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำอยู่ เมื่อกรองตัวอย่างแล้วกรองล้าง crucible ด้วย 78% แอลกอฮอล์ ปริมาตร 15 มิลลิลิตร 2 ครั้ง 95% แอลกอฮอล์ ปริมาตร 15 มิลลิลิตร 1 ครั้ง และอะซิโตน ปริมาตร 10 มิลลิลิตร 1 ครั้ง จากนั้น นำ crucible ไปทำแห้งในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 1 คืน หรือจนกว่าจะได้น้ำหนักที่แน่นอน แล้วนำมาทำให้เย็นในตู้ดูดความชื้นประมาณ 1 ชั่วโมง จากนั้นชั่งน้ำหนักและบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน เพื่อนำไปคำนวณหาปริมาณ IDF RS และ SDFP หรือใยอาหารมวลโมเลกุลสูง (High Molecular Weight Dietary Fiber; HMWDF) ส่วน crucible ที่ออบและชั่งน้ำหนักที่แน่นอนแล้ว นำ crucible ที่ 1 ไปวิเคราะห์หาปริมาณเถ้า และนำ crucible ที่ 2 ไปวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน

สารละลายที่ผ่านการกรอง ซึ่งเป็นส่วนของ SDFS หรือใยอาหารที่ละลายน้ำได้มวลโมเลกุลต่ำ (Low Molecular Weight Dietary Fiber; LMWDF) นั้น นำไปประเหยด้วยเครื่องระเหยสุญญากาศเพื่อกำจัดแอลกอฮอล์ โดยระเหยที่อุณหภูมิ 60°C เมื่อระเหยแอลกอฮอล์ออกจนหมดแล้ว เติมน้ำที่ปราศจากไอออนลงไปในขวดระเหยปริมาตร 5 มิลลิลิตร เขย่าขวดเป็นเวลา 2 นาที เพื่อละลายตัวอย่างออกจากขวดระเหย จากนั้นนำสารละลายตัวอย่างปริมาตร 2 มิลลิลิตร มากำจัดเกลือ

ด้วยเรซินชนิด H^+ และ OH^- อย่างละ 4 กรัม ที่บรรจุในคอลัมน์ polypropylene ขนาด 20 มิลลิลิตร และล้างคอลัมน์ที่บรรจุเรซินทั้ง 2 ชนิดแล้ว ด้วยน้ำปราศจากอออนปริมาตร 20 มิลลิลิตร โดยควบคุมอัตราการไหลผ่านของน้ำล้างให้มีความเร็ว 1.0 มิลลิลิตร/นาที่ เมื่อเติมคอลัมน์เรซินแล้ว จึงเติมสารละลายตัวอย่างปริมาตร 2 มิลลิลิตร ลงไปในคอลัมน์ โดยควบคุมให้มีอัตราการไหลของสารละลายอยู่ที่ 1.0 มิลลิลิตร/นาที่ จากนั้นเติมน้ำปราศจากอออนปริมาตร 20 มิลลิลิตร ลงในคอลัมน์ จากนั้นนำสารละลายที่ผ่านการกำจัดอออนแล้วไประเหยเพื่อกำจัดน้ำออกด้วยเครื่องระเหยสุญญากาศ ที่อุณหภูมิ $60^\circ C$ และเมื่อระเหยเอาน้ำออกจนหมดแล้ว เติมน้ำปราศจากอออนปริมาตร 2 มิลลิลิตร ลงไปในขวดระเหย เขย่าขวดเป็นเวลา 2 นาที เพื่อชะเอาตัวอย่างที่ติดอยู่ในขวดระเหยออก จากนั้นนำสารละลายที่ได้มากรองด้วยเมมเบรนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.45 ไมครอน แล้วเก็บตัวอย่างลงในขวดแก้วขนาดเล็กเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC ต่อไป

เตรียมสารละลายกลูโคสมาตรฐานที่ 3 ความเข้มข้น (5 10 และ 20 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร) และสารละลายมาตรฐาน Liquid Chromatography (LC) (Corn syrup solid ซึ่งเป็นสารที่ประกอบด้วยน้ำตาลโอลิโกแซ็กคาไรด์ที่มีระดับการจัดเรียงพอลิเมอร์มากกว่า 3 หน่วยขึ้นไป Matsutani Chemical Industry Co., Ltd., Japan) วิเคราะห์สารมาตรฐานและสารละลายตัวอย่างด้วยเครื่อง HPLC (Agilent 1260 Infinity LC Systems, Agilent Technologies, USA) โดยใช้คอลัมน์ LC (VertiSep™ Sugar ขนาด 6.5 x 300 mm) เป็นตัวแยกองค์ประกอบ โดยกำหนดอัตราเร็วในการวิเคราะห์ที่ 0.3 มิลลิลิตร/นาที่ และควบคุมอุณหภูมิของคอลัมน์ที่ 80 องศาเซลเซียส จากนั้นคำนวณหาปริมาณใยอาหารตามสมการดังต่อไปนี้

$$\text{Blank (B)} = \frac{BR_1 + BR_2}{2} - P_B - P_A$$

เมื่อ BR_1 และ BR_2 = น้ำหนักของของแข็งที่ค้างอยู่บน crucible ของการวิเคราะห์ซ้ำที่ 1 และ 2 หน่วยเป็นมิลลิกรัม

P_A = ปริมาณโปรตีนของ Blank หน่วยเป็นมิลลิกรัม

P_B = ปริมาณเถ้าของ Blank หน่วยเป็นมิลลิกรัม

$$\text{HMWDF} = \frac{\frac{R_1 + R_2}{2} - P_B - P_A - B}{\frac{M_1 + M_2}{2}} \times 100$$

เมื่อ R_1 = ตะกอนของตัวอย่างที่ค้างอยู่บน crucible ของการวิเคราะห์ตัวอย่างซ้ำ ที่ 1 หน่วยเป็นมิลลิกรัม

R_2 = ตะกอนของตัวอย่างที่ค้างอยู่บน crucible ของการวิเคราะห์ตัวอย่าง
ซ้ำที่ 2 หน่วยเป็นมิลลิกรัม

M_1 = น้ำหนักตัวอย่างของการวิเคราะห์ซ้ำที่ 1 หน่วยเป็นมิลลิกรัม

M_2 = น้ำหนักตัวอย่างของการวิเคราะห์ซ้ำที่ 2 หน่วยเป็นมิลลิกรัม

P_A = ปริมาณของโปรตีนที่ได้จากการวิเคราะห์ R_1 หน่วยเป็นมิลลิกรัม

P_B = ปริมาณของโปรตีนที่ได้จากการวิเคราะห์ R_2 หน่วยเป็นมิลลิกรัม

$$SDFS = R_f \times (W_t - IS) \times (PA - SDFS) / (PA - IS) \times (100/M)$$

เมื่อ R_f (Response factor) = $(PA - IS) / (PA - Glu) \times (W_t - Glu / W_t - IS)$

PA-IS = พื้นที่ใต้กราฟของ internal standard (D-sorbitol)

PA-Glu = พื้นที่ใต้กราฟของสารละลายกลูโคสมาตรฐาน

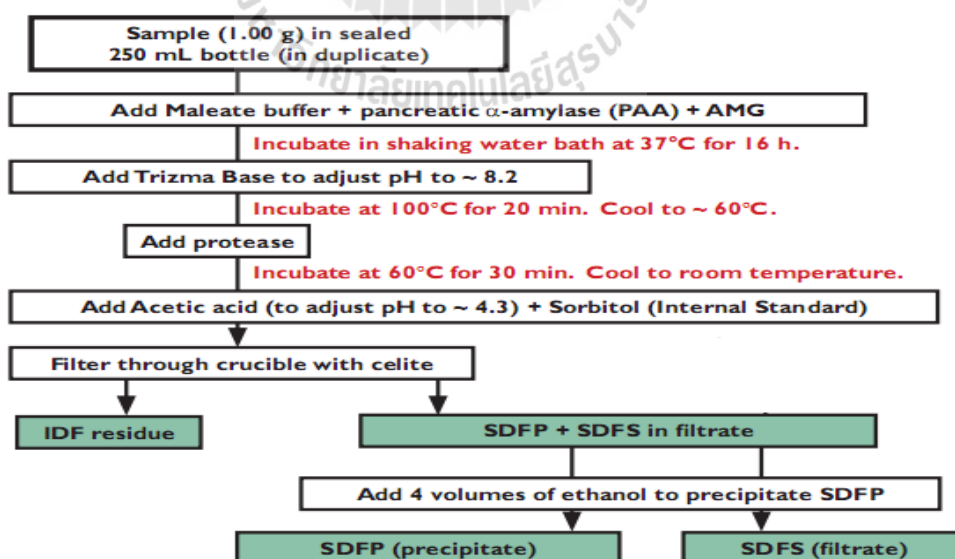
W_t -Glu = น้ำหนักของกลูโคสมาตรฐาน

W_t -IS = น้ำหนักของ internal standard

PA-SDFS = พื้นที่ใต้กราฟของตัวอย่าง

M = น้ำหนักของตัวอย่างที่ค้างอยู่บน crucible

$$TDF (\%) = HMWDF (\%) + SDFS (\%)$$



ภาพที่ 3.1 แผนภาพหลักการการวิเคราะห์ปริมาณใยอาหารตามวิธีของ AOAC 2011.25
ที่มา: AOAC 2011.25

3.6 การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ผลทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) และวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล Analysis of Variance (ANOVA) ด้วยโปรแกรม SPSS 17.0 (SPSS Inc., Illinois, USA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple' Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$)



บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย

4.1 การย่อยสลายด้วยเอนไซม์หรือกรด

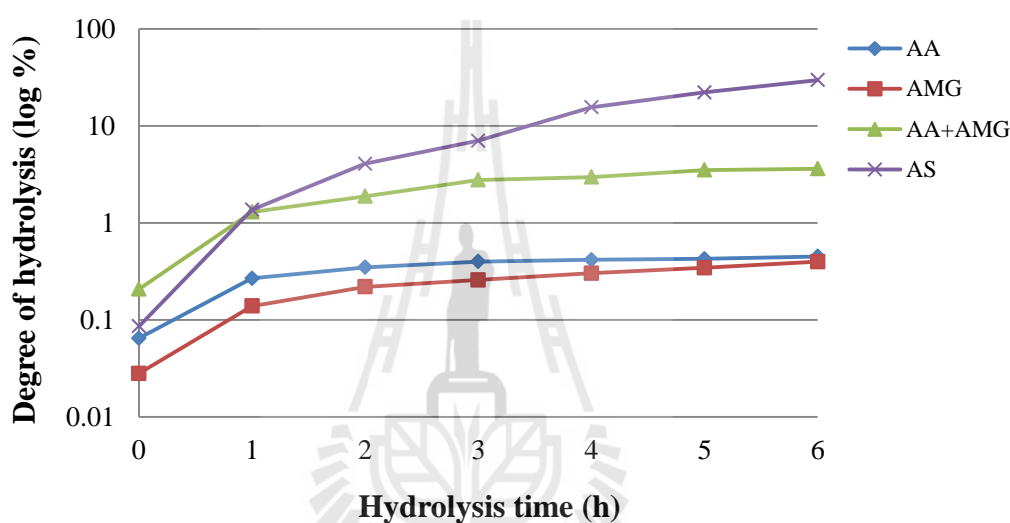
4.1.1 การย่อยสลายด้วยเอนไซม์แบบเดี่ยวและแบบผสม

จากการศึกษาการตัดแปรพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชโดยการย่อยด้วยเอนไซม์แบบเดี่ยว คือ ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA, 120 ยูนิต/กรัมสตาร์ช) หรือเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG, 300 ยูนิต/กรัมสตาร์ช) เพียงอย่างเดียว และแบบผสม (AA + AMG) คือ ย่อยสตาร์ชด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (120 ยูนิต/กรัมสตาร์ช) ร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (300 ยูนิต/กรัมสตาร์ช) เป็นเวลา 0-6 ชั่วโมง พบว่า ระดับการย่อยของเอนไซม์แต่ละกลุ่มซึ่งวัดจากปริมาณน้ำตาลทั้งหมดในสารละลาย มีค่าที่แตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แสดงดังภาพที่ 4.1 โดยการย่อยสตาร์ชด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเพียงอย่างเดียว มีระดับการย่อยน้อยที่สุด เนื่องจากเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสมีคุณสมบัติในการย่อยเป็นแบบ exo-acting enzyme คือเป็นเอนไซม์ที่ย่อยสตาร์ชพอลิเมอร์ได้ทั้งที่พันธะไกลโคไซด์ที่ตำแหน่ง $\alpha-1, 4$ และ $\alpha-1, 6$ โดยจะย่อยจากส่วนปลายด้านนอนรีดิวส์ (non-reducing end) เข้ามาครั้งละ 1 หน่วย ได้เป็นน้ำตาลกลูโคส แต่การย่อยของเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเป็นแบบ endo-acting enzyme คือจะตัดพันธะไกลโคไซด์ที่ตำแหน่ง $\alpha-1, 4$ เท่านั้น และตัดแบบสุ่มได้ผลิตภัณฑ์เป็นมอลโตส มอลโตไตรโอส โอลิโกแซ็กเคอไรด์ และลิมิตเดกซ์ทริน ดังนั้น ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่วัดได้จึงมีปริมาณสูงกว่าการย่อยสตาร์ชด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส

ผลการศึกษาของการย่อยสตาร์ชด้วยเอนไซม์ผสม พบว่ามีการระดับการย่อยมากที่สุดเมื่อเทียบกับการโดยใช้เอนไซม์แบบเดี่ยวที่เวลาในการย่อยเท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากการใช้เอนไซม์ผสมนั้นมีการทำงานที่ส่งเสริมกันเมื่อนำมาใช้ร่วมกัน (Zhang et al., 2013) โดยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสจะย่อยพอลิเมอร์ของสตาร์ชให้เป็นเดกซ์ทริน จากนั้นเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสจะย่อยเดกซ์ทรินให้เป็นกลูโคสอีกครั้ง แม้ว่าเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเพียงอย่างเดียวนั้นก็สามารถย่อยสตาร์ชพอลิเมอร์ให้กลายเป็นกลูโคสได้ แต่จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ปริมาณของน้ำตาลทั้งหมดที่ย่อยออกมาได้เมื่อใช้เอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเพียงชนิดเดียวนั้น มีปริมาณน้อยกว่าการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเพียงอย่างเดียว และการย่อยด้วยเอนไซม์ผสม ซึ่งผลการทดลองนี้มีความสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Zhang et al. (2013) โดยศึกษาการย่อยสตาร์ชข้าวโพดและสตาร์ชมันฝรั่ง ด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเพียงอย่างเดียว และเอนไซม์ผสมระหว่างแอลฟาอะมิเลส

และเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส พบว่าสตาร์ชทั้งสองชนิดถูกย่อยด้วยเอนไซม์ผสมได้ดีกว่าการย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเพียงอย่างเดียว เนื่องมจากการทำงานที่ส่งเสริมกันโดยทำหน้าที่ทั้ง endo-acting enzyme และ exo-acting enzyme ในเวลาเดียวกัน

เมื่อเปรียบเทียบการย่อยสตาร์ชในกลุ่มของเอนไซม์ พบว่าการย่อยสตาร์ชโดยใช้เอนไซม์ผสมจะทำให้สตาร์ชถูกย่อยกลายเป็นน้ำตาลได้มากกว่าการย่อยสตาร์ชด้วยเอนไซม์แบบเดี่ยว ดังนั้นผลผลิตที่ได้เมื่อทำการล้างเพื่อกำจัดน้ำตาลออกไป หลังหยุดปฏิกิริยาของเอนไซม์แล้ว สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์ผสมจะมีปริมาณผลผลิตต่ำกว่าการย่อยสตาร์ชด้วยเอนไซม์แบบเดี่ยว



ภาพที่ 4.1 ปริมาณการย่อยของสตาร์ชด้วยเอนไซม์แบบเดี่ยว คือ ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส เพียงอย่างเดียว (AA) และย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเพียงอย่างเดียว (AMG) แบบผสม คือย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AA + AMG) และย่อยด้วยกรด (AS)

4.1.2 การย่อยสตาร์ชด้วยกรด

ผลของการย่อยเม็ดสตาร์ชด้วยกรดไฮโดรคลอริก (AS) ความเข้มข้น 2.2 M ที่อุณหภูมิ 55°C เป็นเวลา 0-6 ชั่วโมง แสดงดังภาพที่ 4.1 พบว่ากรดนั้นสามารถย่อยสตาร์ชได้ดีกว่าการใช้เอนไซม์และในช่วงแรกของการย่อยที่ 0-1 ชั่วโมง กราฟมีความชันมาก แสดงให้เห็นว่าอัตราการย่อยเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นอัตราการย่อยยังคงเพิ่มขึ้นแต่ช้ากว่าในช่วงแรก ซึ่งกรดจะย่อยสตาร์ชในลักษณะไม่จำเพาะ คือสามารถย่อยได้ทั้งพันธะไกลโคไซด์ที่ตำแหน่ง α -1, 4 และ α -1, 6 ผลการศึกษานี้มีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Robin et al. (1975) ซึ่งได้ทำการทดลองย่อยสตาร์ชมันฝรั่งด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 2.2 M ที่พบว่าอัตราการย่อยที่เกิดขึ้นแบ่งเป็น

2 ช่วง โดยช่วงแรกของการย่อยจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากกรดจะเข้าไปย่อยบริเวณส่วนอสัณฐาน (amorphous) ของเม็ดสตาร์ชซึ่งในส่วนนี้จะมีการจัดเรียงตัวของสายอะมิโลสแบบหลวม ๆ ไม่เป็นระเบียบ การย่อยจึงเกิดขึ้นได้ง่ายและรวดเร็ว ส่วนในช่วงที่สอง การย่อยจะเกิดขึ้นบริเวณผลึก (crystalline) ของเม็ดสตาร์ช ซึ่งมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ การย่อยจึงเกิดขึ้นได้ช้ากว่าช่วงแรก นอกจากนี้รูปแบบของการย่อยที่เกิดขึ้นยังมีความสอดคล้องกับย่อยสตาร์ชที่ได้จากรัณพืชและพืชตระกูลถั่วอีกด้วย (Hoover and Vasanthan, 1994; Inouchi, Glover, and Fuwa, 1987; Jane, Wong, and McPherson, 1997; Vasanthan and Bhatt, 1996) ซึ่งจากการศึกษาดังกล่าวด้วย การใช้ transmission electron microscopy (TEM) ซึ่งให้เห็นว่า การย่อยสตาร์ชด้วยกรดในช่วงแรกนั้นเกิดขึ้นที่บริเวณส่วนอสัณฐานเป็นหลัก ส่วนการย่อยที่เกิดขึ้นได้ช้าบริเวณผลึก ซึ่งอาจเกิดได้จากการที่ไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) ไม่สามารถเจาะเข้าไปภายในส่วนผลึกที่มีการจัดเรียงตัวอย่างหนาแน่นได้ง่าย และอีกประการหนึ่งอาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างแบบเก้าอี้ (chair) ไปเป็นแบบครึ่งเก้าอี้ (half chair) ซึ่งมีความจำเป็นสำหรับการย่อยสลายพันธะไกลโคซิดิกนั้นเกิดขึ้นได้ช้ามาก เนื่องจากโครงสร้างภายในส่วนผลึกของเม็ดสตาร์ชถูกตรึงไม่ให้เคลื่อนที่ (French, 1984; Kainuma and French, 1971)

เมื่อเปรียบเทียบการย่อยสตาร์ชโดยใช้กรดและเอนไซม์ พบว่าการย่อยสตาร์ชโดยใช้กรดทำให้สตาร์ชถูกย่อยกลายเป็นน้ำตาลในปริมาณที่สูงกว่าการย่อยสตาร์ชโดยใช้เอนไซม์ ดังนั้น ผลผลิตของสตาร์ชตัดแปรด้วยกรดที่ได้หลังจากหยุดปฏิกิริยาและล้าง เพื่อกำจัดน้ำตาลออกแล้วจึงต่ำกว่าสตาร์ชที่ถูกตัดแปรโดยใช้เอนไซม์

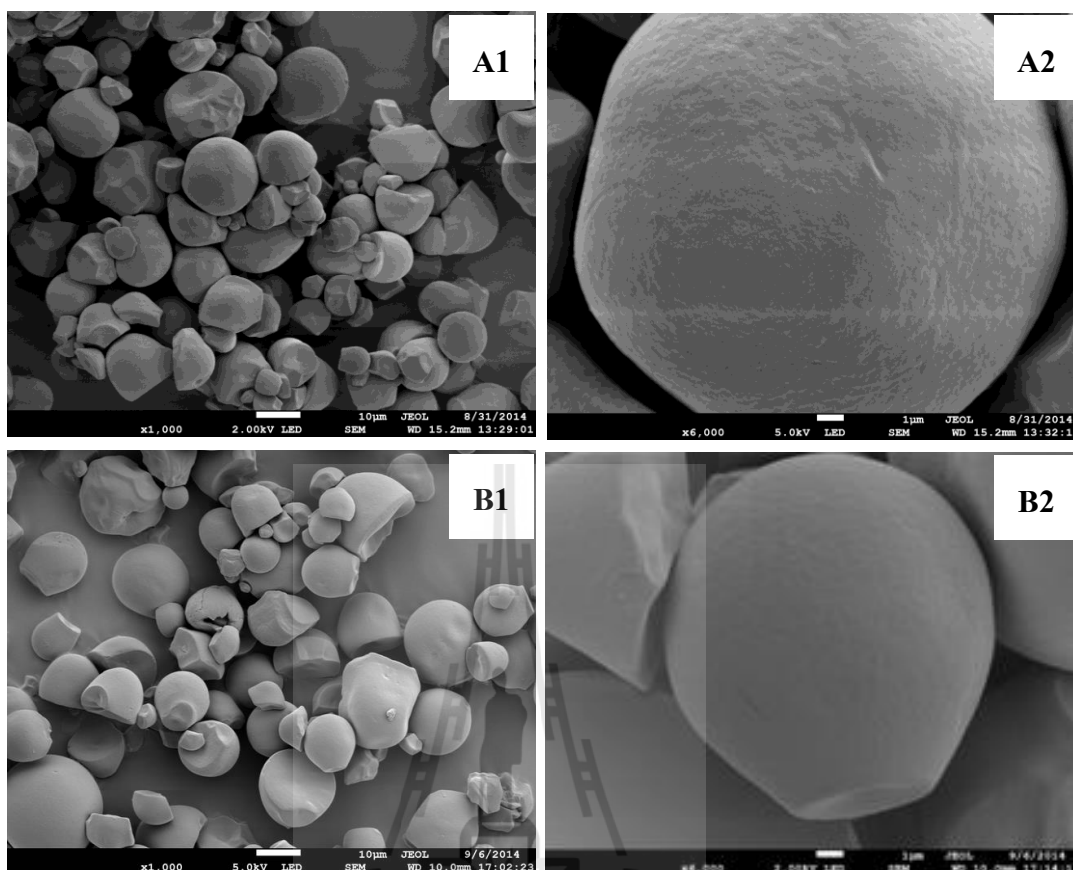
4.2 ลักษณะรูปร่างและพื้นผิวของสตาร์ชก่อนและหลังตัดแปรพื้นผิว

ลักษณะรูปร่างและพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชก่อนและหลังตัดแปรพื้นผิวโดยการย่อยด้วยเอนไซม์แบบเดี่ยว แบบผสมย่อยด้วยกรด เป็นเวลา 1 และ 6 ชั่วโมง และใช้กรดย่อยเป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วบดต่อด้วย ball-mill เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Field Emission Scanning Electron Microscope, FE-SEM) แสดงดังภาพที่ 4.2 และ 4.3 พบว่า สตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (ภาพที่ 4.2A) มีรูปร่างเป็นทรงกลมปลายด้านหนึ่งถูกตัดลักษณะคล้ายปากแตร เรียกบริเวณนี้ว่า Turncatures ซึ่งบริเวณนี้ถือว่าเป็นจุดอ่อนของเม็ดสตาร์ชมันสำปะหลังที่นำไปสู่ความไวต่อปฏิกิริยาต่าง ๆ (Valetudie et al., 1993) ลักษณะพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชก่อนการตัดแปรเมื่อตรวจสอบที่กำลังขยาย 30,000 เท่า (ภาพที่ 4.3A) พบว่าพื้นผิวมีทั้งส่วนที่เรียบและส่วนที่ขรุขระเล็กน้อย แต่ไม่พบลักษณะของรูพรุนขนาดใหญ่ที่ปรากฏบนพื้นผิวเหมือนกับสตาร์ชข้าวโพด ลูกเดือย และข้าวฟ่าง จากการศึกษาของ Huber and BeMiller (2000) โดยใช้ TEM ตรวจสอบเม็ดสตาร์ชจากข้าวโพด ลูกเดือย และข้าวฟ่าง พบว่าสตาร์ชเหล่านี้มีช่องที่ต่อจากรูที่

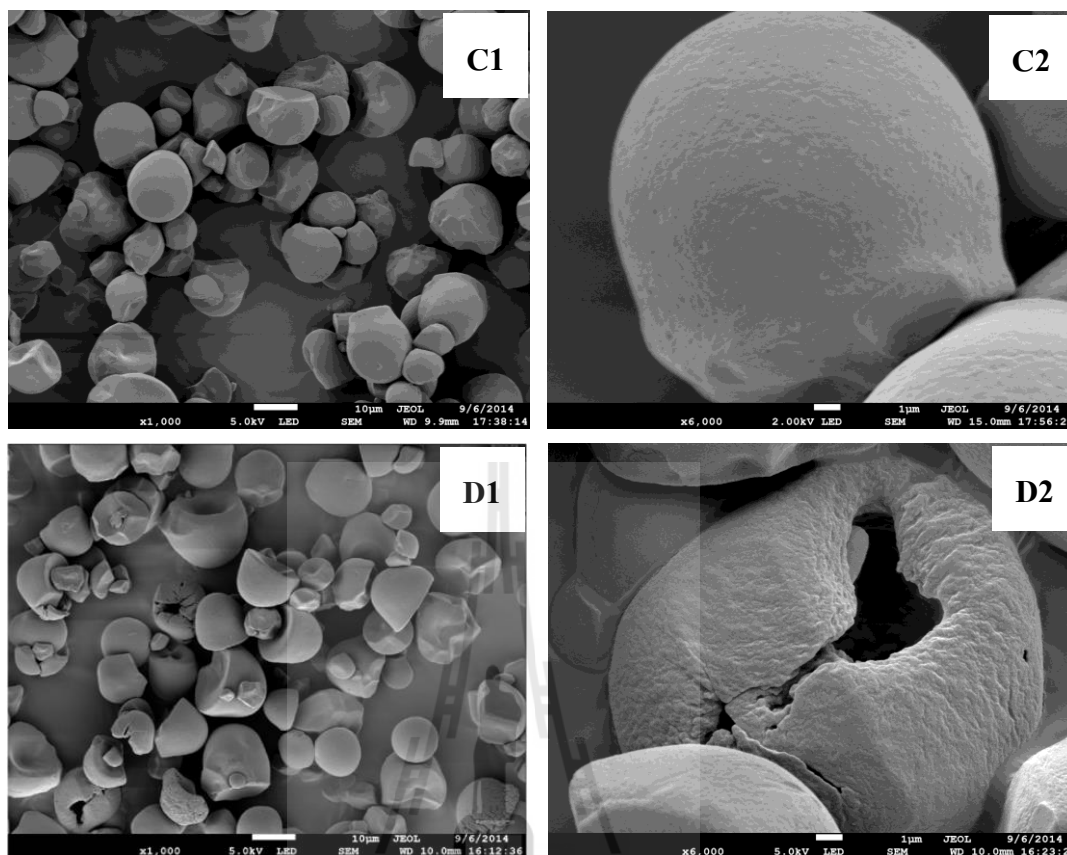
พื้นผิวภายนอกเข้าไปสู่ใจกลางของเม็ดแป้ง หรือ hilum แต่ความลึกของช่องจะแตกต่างกันไป ซึ่งเอนไซม์หรือกรดสามารถแพร่เข้าไปย่อยเม็ดสตาร์ชโดยผ่านช่องเหล่านี้ได้ง่ายและได้ดีกว่าสตาร์ชที่ไม่มีรูพรุนบนพื้นผิว (Rocha et al., 2010)

การย่อยสตาร์ชด้วยเอนไซม์มีผลต่อพื้นผิวของสตาร์ชในรูปแบบที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถจำแนกพื้นผิวที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ออกเป็น 5 รูปแบบได้ดังนี้ รูขนาดเล็ก (pin-holes) รูพรุนที่ถูกกัดเซาะลักษณะคล้ายฟองน้ำ (sponge-like erosion) รูขนาดกลาง (medium-size holes) รูที่รวมกันนำไปสู่รูเดี่ยวขนาดใหญ่ (single holes) และพื้นผิวที่ถูกกัดกร่อน (surface erosion) (Sujka and Jamroz, 2006) โดยทั่วไปเอนไซม์สามารถกัดเซาะจากพื้นผิวภายนอกเข้าไปภายใน (exo-corrosion) และสามารถเข้าไปย่อยภายในเม็ดสตาร์ชผ่านช่องหรือรูที่อยู่บนพื้นผิวออกมาสู่ภายนอกเม็ดสตาร์ช (endo-corrosion)

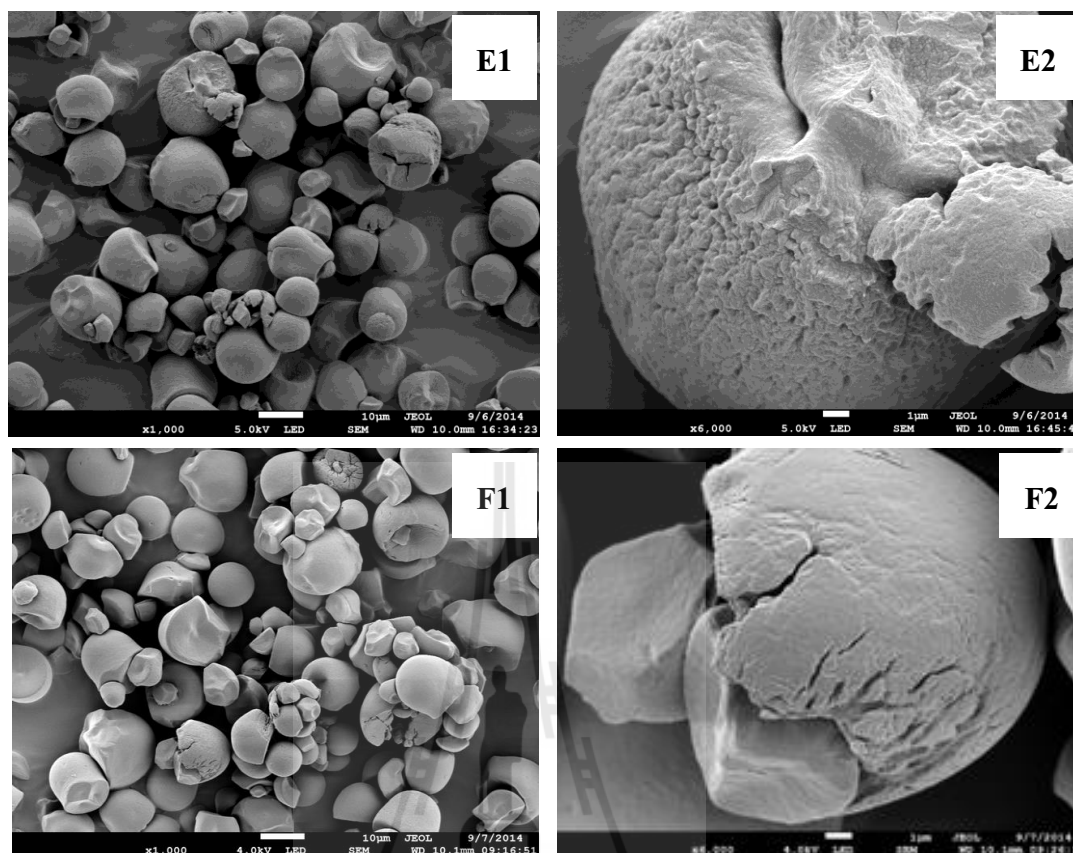
ภาพที่ 4.2 และ 4.3B-G แสดงลักษณะพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์แบบเดี่ยวและแบบผสม ที่อุณหภูมิ 55°C เป็นเวลา 1 และ 6 ชั่วโมง ปรากฏลักษณะพื้นผิวที่แตกต่างกัน โดยสตาร์ชที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเพียงอย่างเดียว แสดงดังภาพที่ 4.2 และ 4.3D-E พบว่าพื้นผิวภายนอกของเม็ดสตาร์ชมีความขรุขระเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาในการย่อยสตาร์ชเพิ่มขึ้น เม็ดสตาร์ชบางส่วนแตกหัก โดยเฉพาะบริเวณ turncature ของเม็ดสตาร์ช เมื่อตรวจสอบพื้นผิวด้วยกำลังขยายสูง พบว่าบางส่วนนั้นเกิดรูพรุนขนาดใหญ่และพื้นผิวถูกกัดเซาะเป็นจำนวนมากเมื่อสตาร์ชถูกย่อยเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ปรากฏการณ์นี้ Huber and BeMiller (2000) ได้อธิบายไว้ว่าเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสสามารถทำให้เกิดช่องเปิดที่นำไปสู่ภายในเม็ดสตาร์ชได้ นอกจากนี้ยังสามารถขยายรูบริเวณพื้นผิวโดยเอนไซม์จะแพร่ผ่านเข้าไปทางรูที่เกิดขึ้นที่พื้นผิวแล้วย่อยจากจุดศูนย์กลางของเม็ดสตาร์ช (hilum) ออกมาสู่พื้นผิวภายนอกได้ (endo-corrosion) จึงทำให้เห็นว่าสตาร์ชที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสนั้นปรากฏรูขนาดใหญ่และมีพื้นที่ผิวขรุขระมาก รูพรุนที่ถูกกัดเซาะมีลักษณะคล้ายกับฟองน้ำ (sponge-like erosion) ส่วนสตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเพียงอย่างเดียว ปรากฏลักษณะพื้นผิวที่แตกต่างออกไป โดยลักษณะและรูปร่างของเม็ดสตาร์ชหลังถูกย่อยนั้นไม่แตกต่างไปจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ เมื่อทำการย่อยสตาร์ชเป็นเวลา 1 และ 6 ชั่วโมง แสดงดังภาพที่ 4.2B-C แต่เมื่อตรวจสอบพื้นผิวที่กำลังขยายสูงของสตาร์ชที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่า มีรูพรุนขนาดเล็ก จำนวนมากเกิดขึ้นที่พื้นผิว (pin-holes) และมีความขรุขระเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับสตาร์ชสำปะหลังดิบ (ภาพที่ 4.3A และ C) แต่ความรุนแรงของการถูกกัดเซาะที่เกิดขึ้นนั้นน้อยกว่าสตาร์ชที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส เนื่องจากการกัดกร่อนของเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเกิดขึ้นที่บริเวณผิวนอก (surface erosion) เท่านั้น ไม่มีการเจาะเข้าไปภายในเม็ดสตาร์ชแล้วย่อยออกมาสู่ด้านนอกพื้นผิว



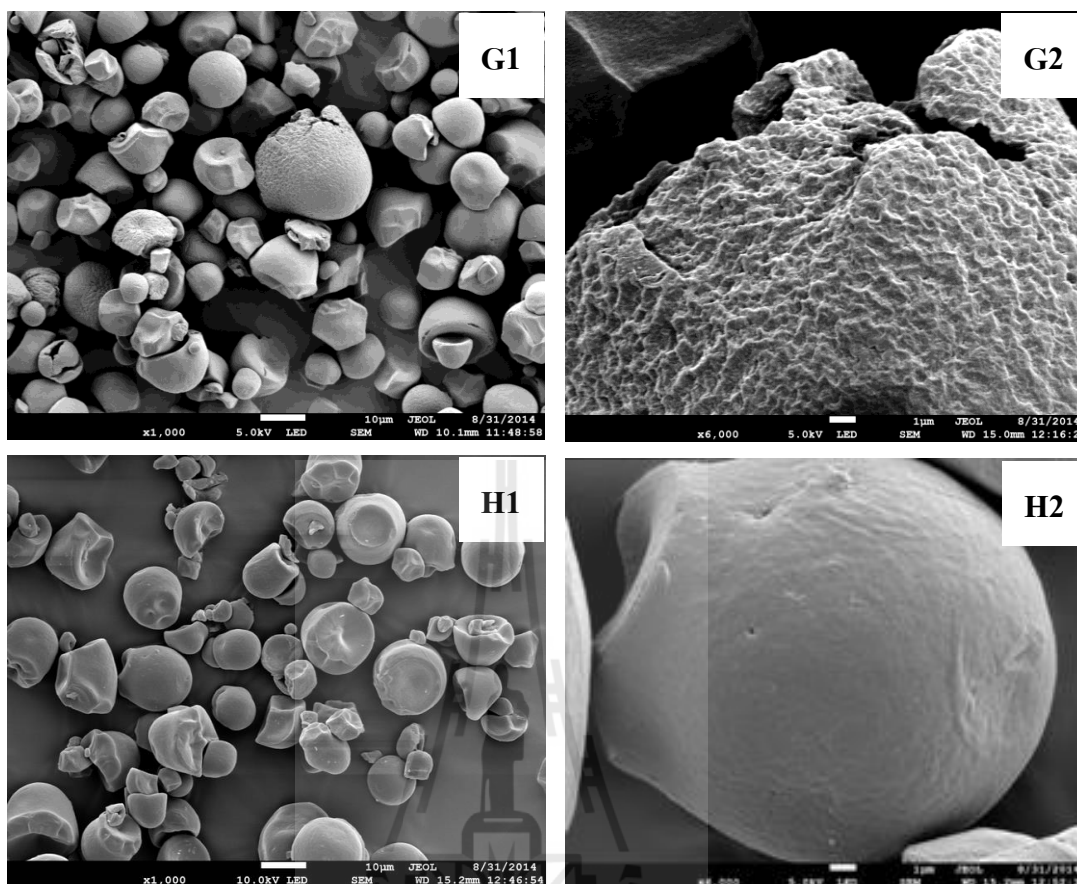
ภาพที่ 4.2 ลักษณะเม็ดสตาร์ชของตัวอย่างสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการคัดแปรด้วยวิธีการต่าง ๆ ที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 1,000 (1) และ 6,000 (2) เท่า: A) สตาร์ชมันสำปะหลังดิบ; B) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง; C) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง; D) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง; E) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง; F) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง; G) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง; H) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง; I) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 6 ชั่วโมง และ J) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 6 ชั่วโมงแล้วบดด้วย ball-mill



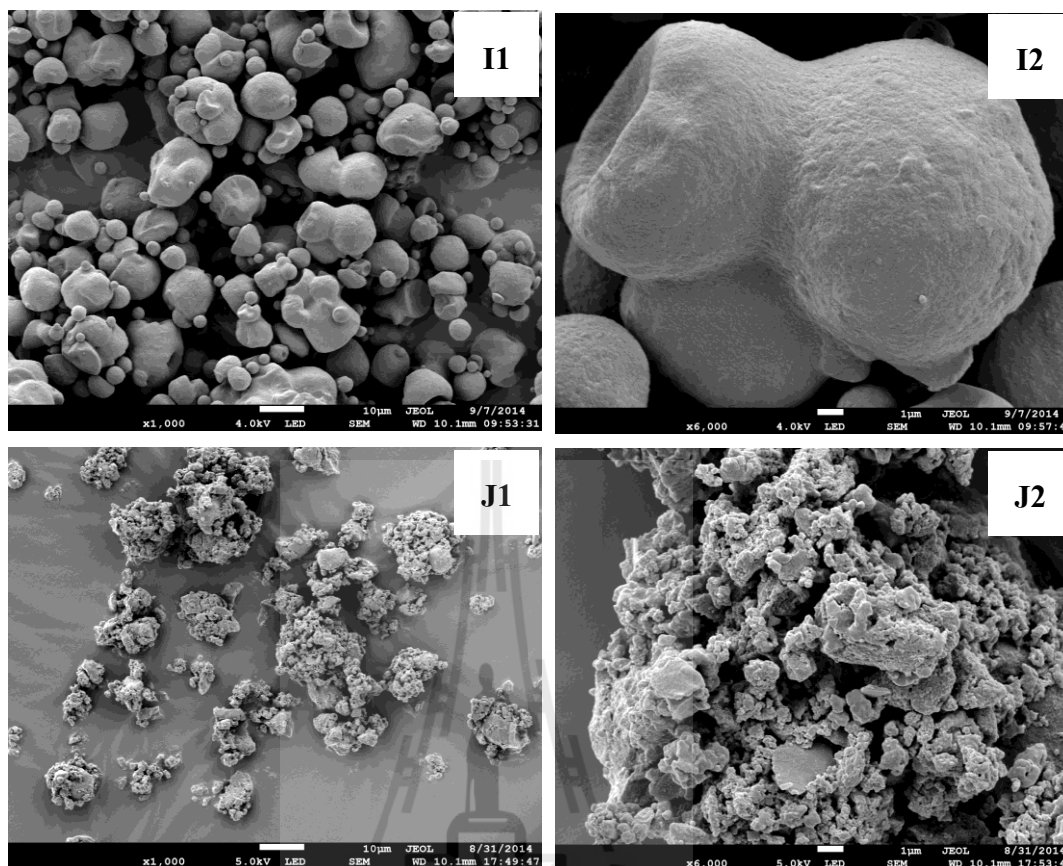
ภาพที่ 4.2 ลักษณะเม็ดสตาร์ชของตัวอย่างสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการตัดแปรด้วยวิธีการต่าง ๆ ที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 1,000 (1) และ 6,000 (2) เท่า: A) สตาร์ชมันสำปะหลังดิบ; B) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง; C) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง; D) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง; E) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง; F) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง; G) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง; H) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง; I) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 6 ชั่วโมง และ J) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 6 ชั่วโมงแล้วบดด้วย ball-mill (ต่อ)



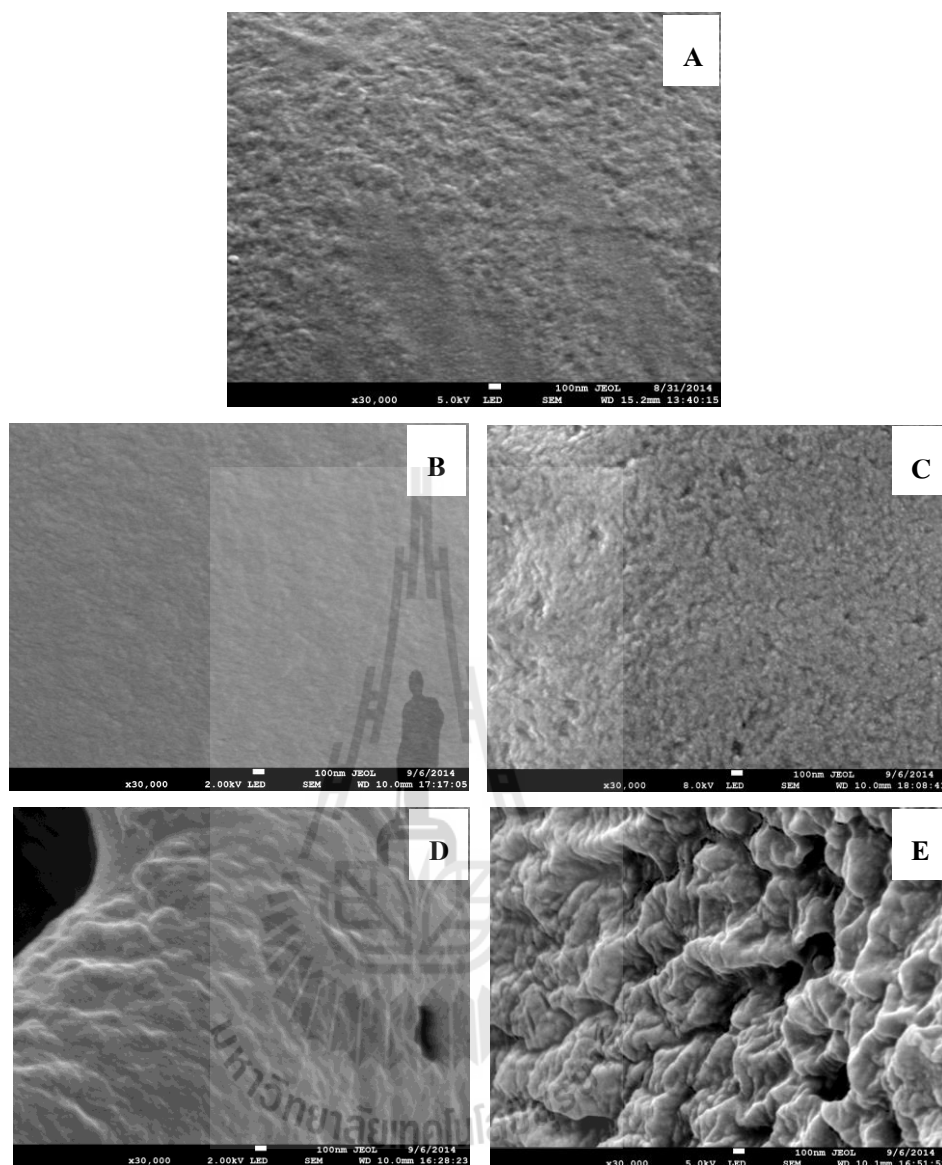
ภาพที่ 4.2 ลักษณะเม็ดสตาร์ชของตัวอย่างสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการคัดแปรด้วยวิธีการต่าง ๆ ที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 1,000 (1) และ 6,000 (2) เท่า: A) สตาร์ชมันสำปะหลังดิบ; B) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง; C) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง; D) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง; E) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง; F) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง; G) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง; H) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง; I) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 6 ชั่วโมง และ J) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 6 ชั่วโมงแล้วบดด้วย ball-mill (ต่อ)



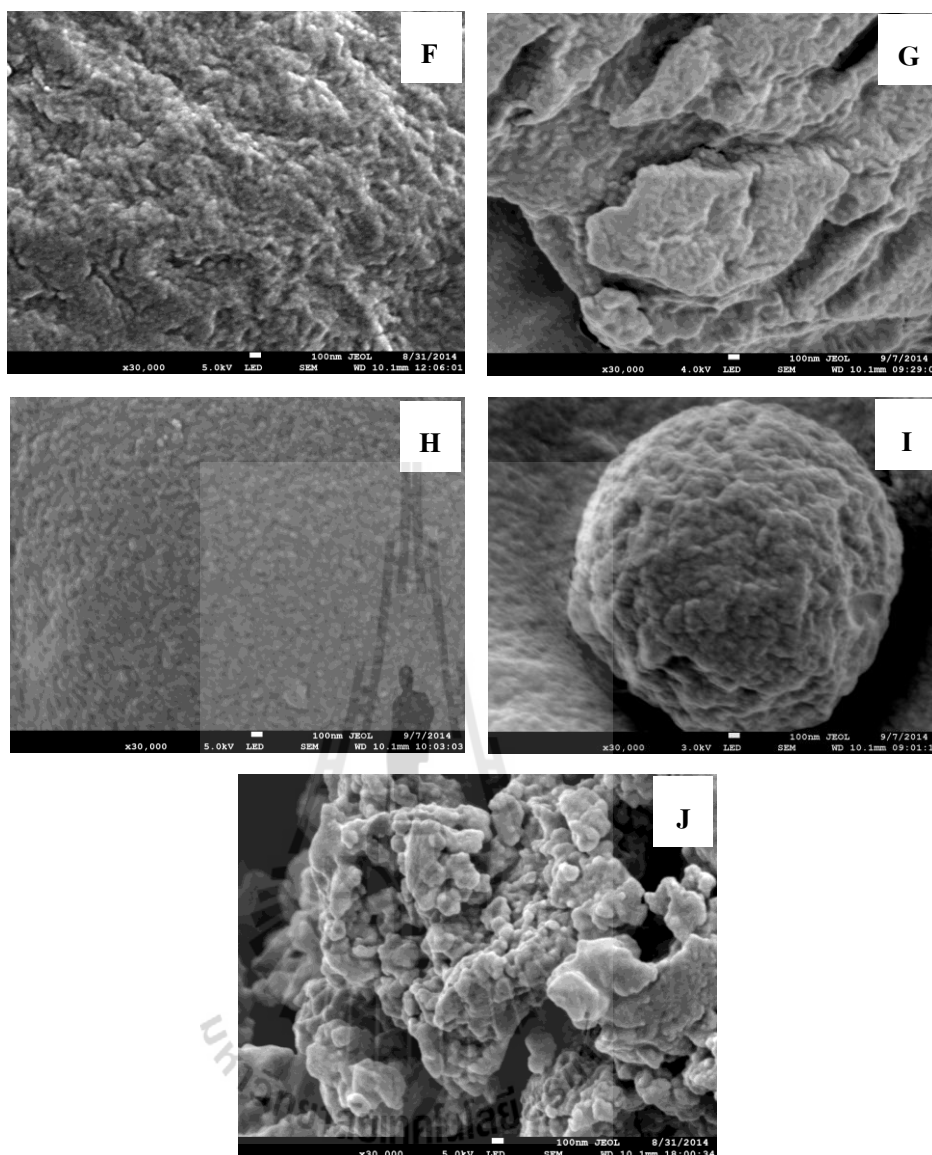
ภาพที่ 4.2 ลักษณะเม็ดสตาร์ชของตัวอย่างสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการคัดแปรด้วยวิธีการต่าง ๆ ที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 1,000 (1) และ 6,000 (2) เท่า: A) สตาร์ชมันสำปะหลังดิบ; B) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง; C) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง; D) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง; E) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง; F) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง; G) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง; H) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง; I) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 6 ชั่วโมง และ J) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 6 ชั่วโมงแล้วบดด้วย ball-mill (ต่อ)



ภาพที่ 4.2 ลักษณะเม็ดสตาร์ชของตัวอย่างสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการดัดแปรด้วยวิธีการต่าง ๆ ที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 1,000 (1) และ 6,000 (2) เท่า: A) สตาร์ชมันสำปะหลังดิบ; B) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง; C) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง; D) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกูโคซิเดสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง; E) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกูโคซิเดสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง; F) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกูโคซิเดสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง; G) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกูโคซิเดสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง; H) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง; I) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 6 ชั่วโมง และ J) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 6 ชั่วโมงแล้วบดด้วย ball-mill (ต่อ)



ภาพที่ 4.3 ลักษณะเม็ดสตาร์ชของตัวอย่างสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการตัดแปรด้วยวิธีการต่าง ๆ ที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 30,000 เท่า: A) สตาร์ชมันสำปะหลังดิบ; B) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง; C) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง; D) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง; E) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง; F) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง; G) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง; H) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง; I) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 6 ชั่วโมง และ J) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วบดด้วย ball-mill



ภาพที่ 4.3 ลักษณะเม็ดสตาร์ชของตัวอย่างสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการดัดแปรด้วยวิธีการต่าง ๆ ที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 30,000 เท่า: A) สตาร์ชมันสำปะหลังดิบ; B) สตาร์ชที่ข่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง; C) สตาร์ชที่ข่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง; D) สตาร์ชที่ข่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง; E) สตาร์ชที่ข่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง; F) สตาร์ชที่ข่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง; G) สตาร์ชที่ข่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง; H) สตาร์ชที่ข่อยด้วยกรดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง; I) สตาร์ชที่ข่อยด้วยกรดเป็นเวลา 6 ชั่วโมง และ J) สตาร์ชที่ข่อยด้วยกรดเป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วบดด้วย ball-mill (ต่อ)

ผลการศึกษาการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ผสมเป็นเวลา 1 และ 6 ชั่วโมง แสดงดังภาพที่ 4.2 F-G พบว่าสตาร์ชมีพื้นผิวที่ขรุขระเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาในการย่อยเพิ่มขึ้นที่เวลาในการย่อยสตาร์ช 6 ชั่วโมง สตาร์ชบางเม็ดเกิดรอยแตกขนาดใหญ่บนผิวนอกของเม็ดสตาร์ช (ภาพที่ 4.3G) และบางเม็ดเกิดเป็นรูเดี่ยวขนาดใหญ่ ภายในมีความขรุขระ และรูที่เกิดขึ้นขยายลงไปสู่ส่วนกลางของเม็ดสตาร์ชอีกด้วย แสดงดังภาพผนวก (ภาพที่ 1) ดังนั้นการย่อยสตาร์ชด้วยเอนไซม์ผสมสามารถอธิบายได้ว่า การย่อยเกิดขึ้นทั้งบริเวณภายนอกพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชและยังย่อยเข้าภายในส่วนกลางของเม็ดสตาร์ชอีกด้วย การศึกษาก่อนหน้านี้ได้อธิบายการกัดเซาะเม็ดสตาร์ชมันสำปะหลังโดยใช้เอนไซม์ผสมไว้ว่า การกัดเซาะเกิดขึ้นที่บริเวณผิวนอกของเม็ดสตาร์ช โดยเริ่มต้นเม็ดสตาร์ชจะถูกย่อยที่บริเวณผิวนอกก่อนด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส ทำให้พื้นผิวมีความขรุขระ บางเม็ดอาจมีขนาดเล็กลง จากนั้นพื้นที่ที่ขรุขระนี้ เอนไซม์จะกัดเซาะต่อไปจนเกิดเป็นรูพรุน ทำให้เอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสแพร่ผ่านเข้าไปย่อยเม็ดสตาร์ชจากภายในแล้วกลายเป็นรูเดี่ยวที่มีขนาดใหญ่ขึ้น (Uthumporna et al., 2010)

สตาร์ชที่ถูกย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริก ที่อุณหภูมิ 55°C เป็นเวลา 1 และ 6 ชั่วโมงนั้น เมื่อตรวจสอบด้วย SEM พบว่า รูปร่าง และขนาดของเม็ดสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ไม่มีความแตกต่างไปจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ แต่เมื่อตรวจสอบที่กำลังขยายสูง พบว่า สตาร์ชมีลักษณะพื้นผิวที่มีความขรุขระเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (ภาพที่ 4.3H) แต่สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่า รูปร่าง ขนาด และลักษณะของพื้นผิวที่เกิดขึ้นแตกต่างจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ และสตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์ (ภาพที่ 4.2 และ 4.3I) จากภาพพบว่ามีเม็ดสตาร์ชขนาดเล็กเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก และยังมีเม็ดสตาร์ชที่หลอมรวมติดกันกลายเป็นเม็ดสตาร์ชขนาดใหญ่ด้วยเช่นกัน เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “melted” (Carolina and Franco, 2010) พื้นผิวภายนอกไม่ปรากฏรูพรุนขนาดกลางหรือขนาดใหญ่เกิดขึ้น แต่เมื่อตรวจสอบพื้นผิวที่กำลังขยายสูง (ภาพที่ 4.3I) พบว่า พื้นผิวมีความขรุขระตลอดทั้งพื้นผิว ลักษณะเหมือนผิวของลูกมะกรูด และไม่ปรากฏรูที่เจาะเข้าไปภายในแกนกลางของเม็ดสตาร์ช ลักษณะเป็นเพียงการกัดกร่อนจากภายนอกเท่านั้น ผลที่เกิดขึ้นนี้มีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Sanguanpong et al. (2003) ที่ทำการศึกษการย่อยสตาร์ชมันสำปะหลังด้วยการใช้กรดไฮโดรคลอริก ซึ่งจากการศึกษานั้นพบว่ากรดได้กัดกร่อนเม็ดสตาร์ชที่บริเวณพื้นผิวภายนอก เมื่อการย่อยเพิ่มขึ้นก็ปรากฏรูเล็ก ๆ บนพื้นผิวของเม็ดสตาร์ช และการย่อยที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลให้เม็ดสตาร์ชมีขนาดเล็กลง และมีรูปร่างที่ผิดปกติไป นอกจากนี้ยังมีการศึกษาของ Atichokudomchai et al. (2000) ซึ่งทำการย่อยสตาร์ชมันสำปะหลังด้วยกรดไฮโดรคลอริก และติดตามการเปลี่ยนแปลงของเม็ดสตาร์ชเมื่อเวลาในการย่อยสตาร์ชเพิ่มขึ้น จากการศึกษาดังกล่าวพบว่า กรดได้เข้าไปย่อยพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชให้หลุดออกทีละชั้น โดยตอนเริ่มต้นของการย่อยเม็ดสตาร์ชมีพื้นผิวก่อนข้างเรียบและเริ่มขรุขระขึ้น จากนั้นเมื่อเวลาผ่านไปผิวชั้นนอกเริ่มหลุดออกเผย

ให้เห็นผิวชั้นถัดมา ซึ่งเป็นผิวที่ค่อนข้างเรียบและถูกย่อยให้หลุดออกเป็นชั้นต่อไป ลักษณะเช่นนี้อาจเป็นสาเหตุให้เม็ดสตาร์ชมีขนาดเล็กถึงแต่ไม่เกิดเป็นรูขนาดใหญ่ เนื่องจากกลไกที่เกิดขึ้นเป็นการกัดกร่อนที่พื้นผิวภายนอกให้หลุดออกไปทีละชั้นเท่านั้น ส่วนเม็ดสตาร์ชที่เกิดการหลอมรวมตัวกันกลายเป็นเม็ดขนาดใหญ่ขึ้น เกิดจากการที่ผิวของสตาร์ชที่ถูกย่อยออกไป เกิดการหลอม (melting) ทำให้เกิดของเหลวลักษณะคล้ายกาวหรือซีเมนต์ไปยึดเม็ดสตาร์ชที่อยู่ใกล้กันเข้ามาติดกัน กลายเป็นเม็ดสตาร์ชที่มีรูปร่างใหม่เกิดขึ้น (Carolina and Franco, 2010)

การคัดแปรเม็ดสตาร์ชด้วยการย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วนำมาบดด้วย ball-mill เป็นเวลา 3 ชั่วโมง (ASBM) เมื่อตรวจสอบด้วย SEM พบว่า เม็ดสตาร์ชมีการเปลี่ยนแปลงทางรูปร่างเป็นอย่างมาก โดยเม็ดสตาร์ชจะแตกออกเป็นอนุภาคนาขนาดเล็ก (small-particle) มีพื้นผิวที่ขรุขระ และสูญเสียลักษณะรูปร่างของเม็ดสตาร์ชไป บางส่วนมีลักษณะถูกทำให้แตกออกเป็นแผ่น และบางส่วนของอนุภาคนาขนาดเล็กนั้น กลับเข้ามารวมตัวกันกลายเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น แสดงดังภาพที่ 4.2J1 และ J2 เมื่อตรวจสอบที่กำลังขยายสูง (ภาพที่ 4.3J) พบว่าพื้นผิวที่ขรุขระนั้น มีลักษณะค่อนข้างมนไม่มีเหลี่ยมมุม จากภาพได้แสดงให้เห็นว่า แรงทางกล (แรงคอมเพรสชัน แรงอิมแพค และแรงแอททริชันหรือแรงเฉือน) ได้ทำลายลักษณะรูปร่างความเป็นเม็ดสตาร์ชให้เกิดการแตกหักเป็นอนุภาคนาขนาดต่าง ๆ ซึ่งกลไกการแตกนี้สามารถจำแนกได้ตามวิธีของ : Popplewell et al. (1989) ออกเป็น 2 ชนิด คือ shattering ซึ่งเป็นกลไกที่ทำให้อนุภาคนาเล็กถึง 2-5 เท่าของอนุภาคเริ่มต้น และ erosion หรือ abrasion เป็นกลไกที่ทำให้อนุภาคนาส่วนใหญ่มีขนาดเล็กถึงมากกว่า 10 เท่า ของขนาดอนุภาคเริ่มต้น (ลักษณะกลไกการแตกดังแสดงใน ภาพที่ 2.7) จากผลการทดลองนั้นแสดงให้เห็นว่าการแตกอาจเกิดขึ้นจากทั้ง 2 แบบ แต่ลักษณะของ erosion หรือ abrasion ที่ทำให้เกิดอนุภาคนาเล็กละเอียดนั้นอาจเกิดขึ้นมากกว่า การแตกแบบ shattering ซึ่งสังเกตจากส่วนที่แตกออกเป็นชิ้นใหญ่ ๆ มีปริมาณน้อยกว่า การย่อยสตาร์ชด้วยกรดก่อนนำไปบดด้วย ball-mill มีส่วนช่วยให้เกิดอนุภาคนาเล็กละเอียดได้ง่ายกว่าการนำสตาร์ชดิบไปทำการบดด้วย ball-mill โดยตรง ซึ่งการศึกษาของ Jane et al. (1992) และ Sanguanpong et al. (2003) ได้กล่าวไว้ว่าการย่อยสตาร์ชด้วยกรดก่อนนั้นเป็นการกำจัดส่วนอัดฐาน ซึ่งเป็นส่วนที่มีความยืดหยุ่นของสตาร์ชออกไป โครงสร้างภายในจึงเปราะ ทำให้การแตกหักเกิดขึ้นได้ง่ายและมีประสิทธิภาพสูง นอกจากนี้การบดด้วย ball-mill เป็นเวลานานยังก่อให้เกิดความร้อน ซึ่งมีส่วนทำให้สตาร์ชเกิดการเจลาติไนซ์ (gelatinization) ได้บางส่วน (Tamaki et al., 1997) ดังนั้นเมื่อสังเกตจากภาพ SEM ที่กำลังขยายสูง (ภาพที่ 4.3J) จึงเห็นพื้นผิวที่ขรุขระนั้นมีความมนไม่มีเหลี่ยมมุม และเศษชิ้นส่วนที่แตกเป็นอนุภาคนาเล็กกลับมามีขนาดใหญ่อีกขึ้น

จากการตรวจสอบเม็ดสตาร์ชที่ถูกคัดแปรพื้นผิวด้วย SEM สตาร์ชที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์แบบเดี่ยว แบบผสม และย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 6 ชั่วโมงมีลักษณะพื้นผิวที่แตกต่างจากสตาร์ช

มันสำปะหลังดิบอย่างชัดเจน ดังนั้น ในการศึกษาจึงเลือกสตาร์ชที่ข่อยด้วยเอนไซม์และกรด เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ไปทำการศึกษาคุณสมบัติอื่น ๆ ในขั้นต่อไป

4.3 ลักษณะโครงสร้างและปริมาณผลึกของสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการดัดแปรพื้นผิว

ผลการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างและปริมาณผลึกของสตาร์ชด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) ของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ และสตาร์ชที่ถูกข่อยด้วยเอนไซม์แบบเดี่ยวแบบผสม ข่อยด้วยกรด เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แสดงดังภาพที่ 4.4 พบว่า X-ray diffraction pattern ของทุกตัวอย่างสตาร์ชมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ A ซึ่งจะปรากฏพีกเดี่ยว (Single peak) ที่ชัดเจนที่ตำแหน่ง 2θ ที่ 15° และ 23° และปรากฏพีกคู่ (Double peak) ที่ตำแหน่ง 2θ ที่ 10° 11° และ 17° 18° โดยโครงสร้างผลึกแบบ A นี้ สามารถพบได้ทั่วไปในสตาร์ชจากธัญพืช นอกจากนี้ยังมีการศึกษาอื่น ๆ ที่ระบุว่าสตาร์ชมันสำปะหลังซึ่งเป็นพืชตระกูลหัวหรือรากนี้มีโครงสร้างผลึกแบบ A อีกด้วย (Atichokudomchai et al., 2001; Sanguanpong et al., 2003; Carolina et al., 2010)

จากภาพที่ 4.4 ยังพบอีกว่าสตาร์ชที่ถูกข่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball-mill (ASBM) นั้นมีการแสดงลักษณะทางโครงสร้างผลึกที่แตกต่างออกไปจากสตาร์ชดิบ และสตาร์ชที่ดัดแปรด้วยการใช้กรดและเอนไซม์ คือ ปรากฏพีกเดี่ยวที่ 2θ ที่ 20° ซึ่งเป็นลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ V สตาร์ช (Amparo et al., 2008) โดยทั่วไปแล้วสตาร์ชจะแสดงลักษณะโครงสร้างของผลึก เป็นแบบ A B และ C นอกจากนี้ยังมีโครงสร้างของผลึกแบบ V ซึ่งเกิดจากการรวมตัวของสายอะมิโลสกับสารประกอบเชิงซ้อน เช่น ไอโอดีน DMSO แอลกอฮอล์ และกรดไขมัน อีกด้วย (Buléon et al., 1998) การที่ตัวอย่าง ASBM แสดงลักษณะโครงสร้างทางผลึกแบบ V นั้น เนื่องจากในขั้นตอนการ ball-mill มีการเตรียมตัวอย่างที่ข่อยด้วยกรดเป็นเวลา 6 ชั่วโมงแล้ว ได้มีการใช้แอลกอฮอล์ 99% เป็นตัวช่วยในการกระจายตัวอย่างในระหว่างการบด ดังนั้นอะมิโลสในตัวอย่างสตาร์ชจึงอาจเกิดการรวมตัวกับแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการกระจายตัวอย่าง จึงทำให้เกิดโครงสร้างผลึกแบบ V ขึ้น

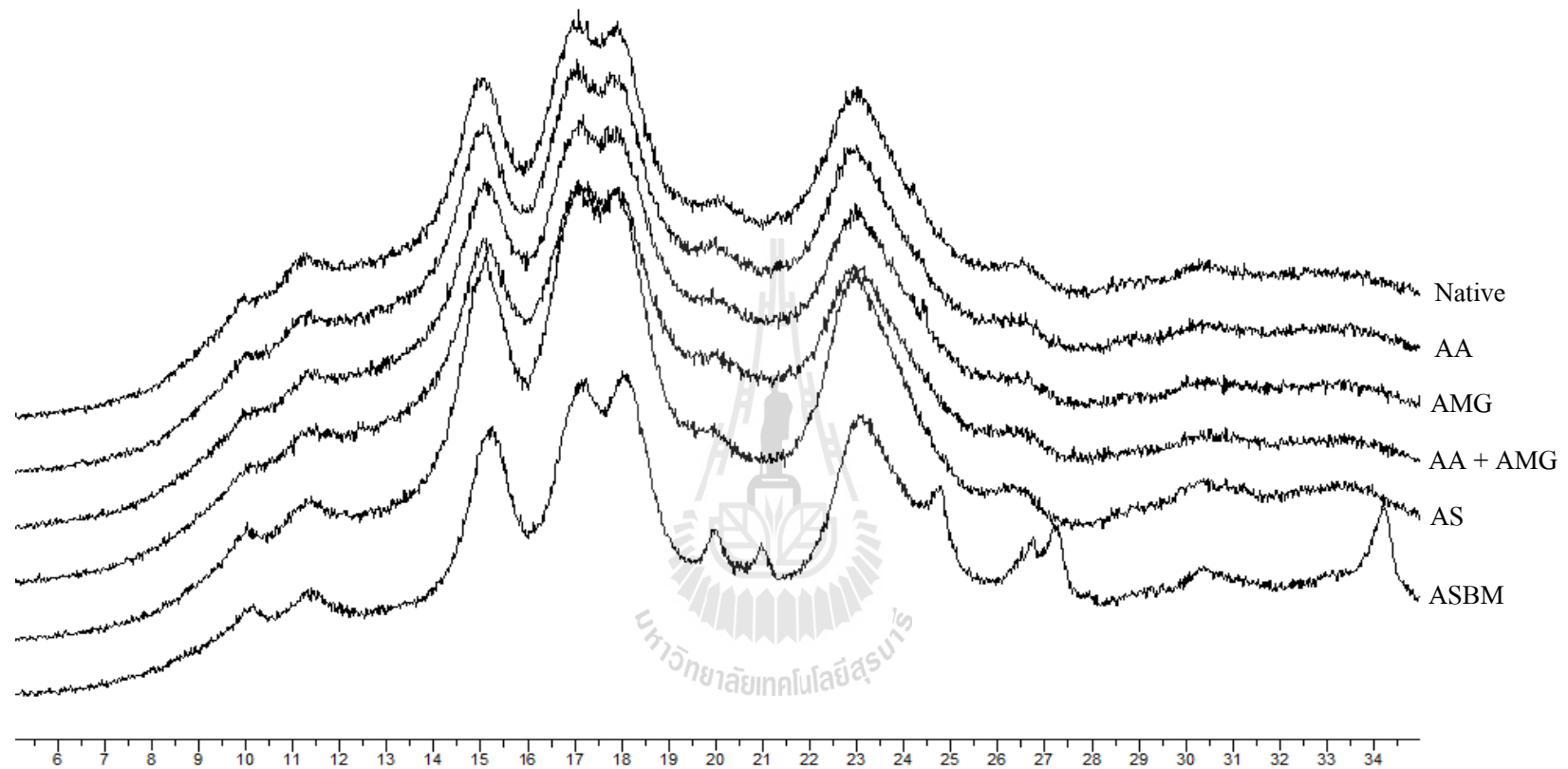
การตรวจสอบปริมาณผลึก (Degree of crystallinity) ของสตาร์ชก่อนและหลังดัดแปร แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่า วิธีการดัดแปรสตาร์ชที่แตกต่างกันมีผลต่อการเพิ่มขึ้นและลดลงของปริมาณผลึกที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยตัวอย่างที่ถูกข่อยด้วยกรดเป็นเวลา 6 ชั่วโมง นั้นมีปริมาณผลึกสูงที่สุด และเมื่อนำตัวอย่างที่ข่อยด้วยกรดไปบดด้วย ball-mill เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่าปริมาณผลึกลดลง แต่ยังสูงกว่าตัวอย่างที่ถูกข่อยด้วยเอนไซม์เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ ตัวอย่างที่ข่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเพียงอย่างเดียว มีปริมาณผลึกไม่แตกต่างจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ ส่วนตัวอย่างที่ข่อยด้วยเอนไซม์

แอลฟาอะมิเลสเพียงอย่างเดียว และตัวอย่างที่ย่อยด้วยเอนไซม์ผสมระหว่างเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส และเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส มีปริมาณผลึกลดลง

ปริมาณผลึกที่เพิ่มขึ้นของตัวอย่างที่ย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 6 ชั่วโมง เกิดเนื่องจากกรดเข้าไปทำลายบริเวณออสติฐานของสตาร์ชจึงส่งผลให้ปริมาณผลึกนั้นเพิ่มขึ้น สามารถสังเกตได้จาก X-ray pattern ที่เพิ่มสูงขึ้น (Wang and Wang, 2001) และเมื่อนำตัวอย่างที่ย่อยด้วยกรด ไปบดต่อด้วย ball-mill ผลึกมีปริมาณลดลง เกิดเนื่องจากแรงทางกลที่เกิดขึ้นระหว่างการ ball-mill เป็นตัวเหนี่ยวนำทำให้เกิดพลังงานความร้อน ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ปริมาณผลึกลดลงไป (Sanguanpong et al., 2003)

ผลของปริมาณผลึกในตัวอย่างสตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แบบเดี่ยวและแบบผสม โดยสตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเพียงอย่างเดียว และเอนไซม์ผสม มีปริมาณผลึกลดลงโดยการลดลงของผลึกในตัวอย่างสตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์ผสม มีการลดลงมากที่สุด และตัวอย่างสตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส เพียงอย่างเดียว มีปริมาณผลึกรองลงมา ส่วนตัวอย่างที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเพียงอย่างเดียว มีปริมาณผลึกไม่แตกต่างจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ เนื่องจากเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสอาจย่อยสตาร์ชพอลิเมอร์ในบริเวณส่วนออสติฐานและส่วนของผลึกในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน อัตราการลดลงของทั้งสองส่วนที่ใกล้เคียงกันนี้ เมื่อนำมาคำนวณหาปริมาณผลึกซึ่งคำนวณในเชิงสัดส่วน (Relative crystallinity) จึงไม่มีความแตกต่างจากปริมาณเริ่มต้น ส่วนตัวอย่างสตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส เพียงอย่างเดียว มีปริมาณผลึกลดลงเนื่องจาก เอนไซม์แอลฟาอะมิเลสมีกกลไกการย่อยสตาร์ชพอลิเมอร์แบบสุ่ม การตัดสายพอลิเมอร์ของสตาร์ชจะตัดได้ยาวกว่าการย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส ที่จะตัดพอลิเมอร์ของสตาร์ชทีละหน่วยเพื่อให้ได้กลูโคส ดังนั้นอาจเป็นไปได้ว่าเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสจะสุ่มตัดพอลิเมอร์ของสตาร์ชเข้ามาจนถึงบริเวณส่วนของผลึกได้ นอกจากนี้ Hoover (2003) ยังเสนอว่าการย่อยสตาร์ชด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเป็นเวลานาน มีผลต่อการทำลายบริเวณผลึก และยังส่งผลให้พลังงานความร้อนที่ทำให้สตาร์ชเกิดเจลาติไนเซชัน (Enthalpy, ΔH) มีค่าลดลงอีกด้วย

การลดลงมากที่สุดของผลึกในตัวอย่างสตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์ผสมนั้น อาจเป็นผลมาจากการทำงานแบบเสริมประสิทธิภาพซึ่งกันและกันของทั้งสองเอนไซม์ที่มีการทำงาน แบบ endo- และ exo-enzyme ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว นอกจากนี้การแพร่และการดูดซับเอนไซม์ยังมีอิทธิพลต่อการเริ่มต้นการย่อยเม็ดสตาร์ชอีกด้วย (Helbert et al., 1996) การแพร่ของเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสไปบนพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชนั้น เป็นขั้นตอนที่สำคัญสำหรับกระบวนการย่อยเป็นอย่างมาก เมื่อเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสแพร่ไปยังพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชแล้ว บริเวณพื้นผิวภายนอกจะเกิดเป็นรูพรุนขนาดเล็กขึ้นจำนวนมาก (ภาพที่ 4.3C) หลังจากนั้นเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสจะแพร่ผ่านรูพรุนดังกล่าวเข้าไปย่อยภายในเม็ดสตาร์ชได้ง่ายขึ้น ทำให้ปริมาณผลึกของสตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์ผสมมีปริมาณผลึกลดลงมากกว่ากระบวนการย่อยแบบอื่น



20

ภาพที่ 4.4 ลักษณะโครงสร้างผลึกของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (Native Starch); สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA); สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์ อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG); สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส(AA + AMG); สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด (AS); และสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball-mill (ASBM)

ตารางที่ 4.1 ปริมาณความเป็นผลึกของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (Native starch) สตาร์ชที่ย่อยด้วย เอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสร่วมกับเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA + AMG) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด (AS) และสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดและบดด้วย ball-mill (ASBM)

Sample	Relative crystallinity (%)	Crystalline pattern
Native starch	24.58 ± 0.17^c	A
AA	22.23 ± 1.25^d	A
AMG	25.34 ± 0.23^c	A
AA + AMG	21.88 ± 0.45^e	A
AS	34.88 ± 0.46^a	A
ASBM	31.05 ± 0.80^b	A + V

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวดิ่ง หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

4.4 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการดัดแปรพื้นผิว

ค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคเฉลี่ยสตาร์ชมันสำปะหลังดิบและสตาร์ชที่ถูกย่อยด้วย เอนไซม์แบบเดี่ยว แบบผสม ย่อยด้วยกรด เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด 6 ชั่วโมง และบดด้วย ball-mill เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แสดงดังตารางที่ 4.2 โดยตัวอย่างสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ มีเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ 14.71 ไมครอน

ตารางที่ 4.2 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (Native starch) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสร่วมกับเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA + AMG) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด (AS) และสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball-mill (ASBM)

ตัวอย่าง	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (μm)
Native starch	14.71 ± 0.04^b
AA	14.73 ± 0.09^b
AMG	14.70 ± 0.20^b

ตารางที่ 4.2 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (Native starch) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสร่วมกับเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA + AMG) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด (AS) และสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball-mill (ASBM) (ต่อ)

ตัวอย่าง	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (μm)
AA + AMG	14.72 ± 0.21^b
AS	15.93 ± 0.42^c
ASBM	9.96 ± 0.04^a

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวดิ่ง หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

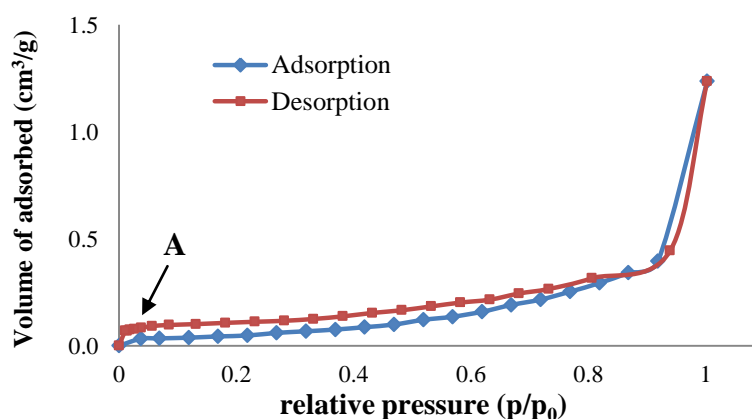
หลังการคัดแปรสตาร์ชด้วยเอนไซม์ทั้งแบบเดี่ยวและแบบผสม การกระจายตัวของขนาดอนุภาคเฉลี่ยมีค่าไม่แตกต่างไปจากสตาร์ชดิบ ดังนั้นจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าการย่อยสตาร์ชด้วยเอนไซม์เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ไม่ได้ทำให้ขนาดของเม็ดสตาร์ชเปลี่ยนแปลงไป เพียงแต่ทำให้พื้นผิวที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงไปเท่านั้น ดังแสดงในภาพถ่าย SEM แต่ตัวอย่างที่ถูกย่อยด้วยกรด และตัวอย่างที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball-mill มีขนาดที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากการถูกคัดแปร โดยตัวอย่างที่ย่อยด้วยกรด มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 15.93 ไมครอน เมื่อเทียบกับตัวอย่างสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ สาเหตุที่ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของตัวอย่างที่ถูกย่อยด้วยกรด มีขนาดเพิ่มขึ้นเนื่องจาก ในระหว่างการย่อยสตาร์ช กรดนั้นเข้าทำลายที่บริเวณพื้นผิวของสตาร์ช จากนั้นส่วนที่ถูกย่อยออกไปเกิดการหลอม (melting) ทำให้เกิดของเหลวลักษณะคล้ายกาวไปยึดเม็ดสตาร์ชที่อยู่ใกล้เข้ามาติดกัน ทำให้ขนาดอนุภาคของสตาร์ชที่คัดแปรด้วยวิธีนี้บางส่วนมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่วนตัวอย่างที่ย่อยด้วยกรดและบดด้วย ball-mill มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยลดลงมากเมื่อเทียบกับสตาร์ชดิบ โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ 9.96 ไมครอน ทั้งนี้เนื่องจากการ ball-mill เป็นการทำให้วัตถุถูกกระแทก (Catacting/Impact grinding force) และ/หรือขัดสี (Abrasion/Attrition grinding force) ด้วยลูกบอลเซรามิกจนเกิดการแตกและสลายตัวเล็กลงจนได้ขนาดตามที่ต้องการ (วิระยุทธ, 2546)

4.5 ผลของขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุนของสตาร์ชดัดแปรพื้นผิว

4.5.1 ลักษณะการดูดซับ และการคายซับของแก๊สไนโตรเจนบนพื้นผิวของสตาร์ช

ผลการศึกษาขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยวิธีการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่ความดันต่ำ พบว่า ไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับ (adsorption and desorption isotherm) ของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ ดังแสดงในภาพที่ 4.5 เมื่อจำแนกไอโซเทอมของการดูดซับตามระบบ IUPAC (Sing et al., 1985) ไอโซเทอมที่เกิดขึ้นแสดงลักษณะเป็นไอโซเทอมชนิดที่ 2 (Type II) นอกจากนี้สตาร์ชหลังการดัดแปรด้วยวิธีการต่าง ๆ ได้แสดงไอโซเทอมเป็นแบบชนิดที่ 2 เช่นกัน แสดงดังภาคผนวกภาพภาคผนวกที่ 9 ซึ่งการดูดซับในแบบไอโซเทอมชนิดที่ 2 เป็นการดูดซับทั้งทางเคมีและกายภาพ ลักษณะไอโซเทอมมีลักษณะคล้ายตัว S (S-shaped isotherm) เป็นการดูดซับที่พบได้ในตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุนหรือมีรูพรุนขนาดใหญ่ (macroporous) จากการที่รูพรุนมีการกระจายขนาดในช่วงกว้าง การดูดซับจึงเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) ขึ้นอย่างสมบูรณ์ที่จุดเปลี่ยนกราฟ (ภาพที่ 4.5 จุด A) จากนั้นจำนวนชั้นของการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเป็นแบบหลายชั้น (multilayer isotherm) เมื่อความดันสัมพัทธ์ (p/p_0) มีค่าสูงขึ้น (Juszcak et al., 2002)

ในช่วงแรกของการดูดซับ ที่ความดันสัมพัทธ์ประมาณ 0.05 และที่ความดันของการดูดซับในช่วงต่ำ ๆ (~ 0.3) เป็นช่วงของการดูดซับแก๊สแบบชั้นเดียว โมเลกุลของแก๊สจะเรียงตัวบนพื้นผิวของตัวอย่าง เมื่อแก๊สเรียงตัวจนเต็มพื้นที่ผิวของตัวอย่างแล้ว ปริมาณของแก๊สที่ถูกดูดซับในช่วงนี้จะถูกนำมาคำนวณเป็นพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวอย่างด้วยสมการ BET โดยกราฟ BET แสดงดังภาคผนวก ภาพภาคผนวกที่ 8 นอกจากนี้ลักษณะของไอโซเทอม (ภาพที่ 4.5) ยังสามารถสันนิษฐานได้ว่ารูที่สร้างขึ้นบนพื้นผิวของตัวอย่างมีลักษณะเป็นแบบกรวย (Juszcak et al., 2002)



ภาพที่ 4.5 ไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption) และการคายซับ (Desorption) แก๊สไนโตรเจนของตัวอย่างสตาร์ชมันสำปะหลัง และ A แสดงจุดเปลี่ยนของกราฟ เมื่อการดูดซับแบบชั้นเดียวเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์

4.5.2 ปริมาณของพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรของรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุน

ปริมาณของพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรของรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุน เมื่อคำนวณจากส่วนของเส้นตรงที่ได้จากไอโซเทอมการดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์ระหว่าง 0.05-0.25 ด้วยสมการ BET ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่า เมื่อนำสตาร์ชมันสำปะหลังดิบมาดัดแปรด้วยวิธีการต่าง ๆ แล้ว สตาร์ชหลังการดัดแปรมีปริมาณของพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรของรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนเพิ่มขึ้นในทุกตัวอย่าง โดยก่อนดัดแปรนั้น สตาร์ชมันสำปะหลังดิบ มีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ที่ $0.15 \text{ m}^2/\text{g}$ มีปริมาตรของรูพรุน $0.03 \text{ cm}^3/\text{g}$ และรูพรุนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 1.64 nm ซึ่งการศึกษาของ Hellman and Melvin (1950) ได้ทำการตรวจสอบพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยวิธีการดูดซับไนโตรเจน พบว่าสตาร์ชมันสำปะหลังมีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ที่ $0.28 \text{ m}^2/\text{g}$ ทั้งนี้ปริมาณพื้นที่ผิวที่เกิดขึ้นอาจแปรผันตามถิ่นกำเนิดและสายพันธุ์ของสตาร์ช นอกจากนี้หากจำแนกขนาดของรูพรุนตามวิธีของ IUPAC สตาร์ชมันสำปะหลังก่อนการดัดแปรจะมีรูพรุนเป็นแบบ micropore คือมีรูพรุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 2 nm (Sing et al., 1985)

ตารางที่ 4.3 ปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรของรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (Native starch) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสร่วมกับเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA + AMG) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด (AS) และสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball-mill (ASBM)

ตัวอย่าง	พื้นที่ผิวจำเพาะ	ปริมาตรของรูพรุน	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุน
	(m^2/g)	(cm^3/g)	(nm)
Native starch	0.15	0.03	1.64
AA	0.64	0.15	12.23
AMG	1.66	0.38	21.12
AA + AMG	1.35	0.31	17.12
AS	1.25	0.29	21.87
ASBM	3.58	0.82	47.11

หลังจากการคัดแปรสสารด้วยวิธีการต่าง ๆ พบว่าตัวอย่างที่ถูกคัดแปรมีการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรของรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุน ดังแสดงในตารางที่ 4.3 หลังการคัดแปรขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนที่เพิ่มขึ้นเมื่อจำแนกตามวิธีของ IUPAC แล้ว รูพรุนที่มีขนาดเพิ่มขึ้นเป็นรูพรุนชนิด mesopore คือ มีความกว้างของรูพรุนเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2-50 nm (Sujka and Jamroz, 2006)

ตัวอย่างที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดต่อด้วย ball-mill มีการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรของรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนมากที่สุด เนื่องจากวิธีการที่ใช้คัดแปรนั้นมีสถานะที่รุนแรงทำให้สสารแตกเป็นเศษชิ้นส่วนเล็ก ๆ และมีพื้นที่ผิวที่ขรุขระเป็นอย่างมาก (ภาพที่ 4.2F1 และ F2) พื้นที่ผิวจำเพาะจึงเพิ่มขึ้นมากเช่นกัน ส่วนตัวอย่างที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเพียงอย่างเดียว ตัวอย่างที่ย่อยด้วยเอนไซม์ผสม และตัวอย่างที่ย่อยด้วยกรด มีพื้นที่ผิวจำเพาะที่เพิ่มขึ้นน้อยกว่าตัวอย่างที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดต่อด้วย ball-mill ตามลำดับ ส่วนตัวอย่างที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเพียงอย่างเดียว มีการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรของรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนน้อยที่สุด

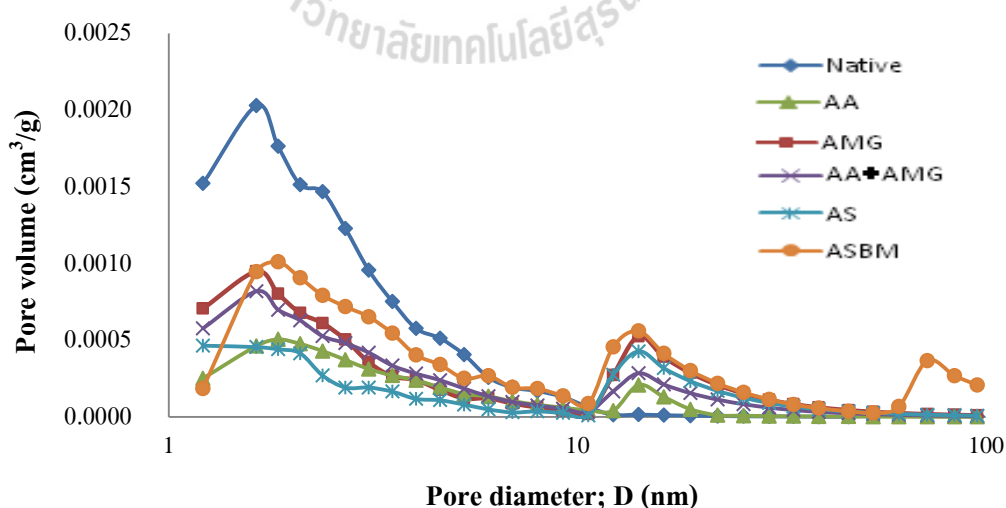
ค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยและปริมาตรของรูพรุนนั้นมีความสัมพันธ์กัน ซึ่งทำให้สามารถสันนิษฐานลักษณะของรูพรุนที่เกิดขึ้นได้จากตารางที่ 4.3 ตัวอย่างที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเพียงอย่างเดียว มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนและปริมาตรของรูพรุนน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่คัดแปรด้วยวิธีอื่น ซึ่งสอดคล้องกับภาพ SEM ภาพที่ 4.2B1 B2 และภาพที่ 4.3B โดยตัวอย่างที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเพียงอย่างเดียว มีรูปร่างไม่แตกต่างไปจากสสารดิบ และยังปรากฏรูขนาดเล็กบนพื้นผิว ซึ่งไม่มีรูขนาดใหญ่เกิดขึ้น ซึ่งรูพรุนที่เกิดขึ้นของตัวอย่างที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเพียงอย่างเดียว อาจมีลักษณะที่แคบและตื้น ตัวอย่างที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเพียงอย่างเดียว เป็นรูพรุนที่มีความกว้างและลึกซึ่งสอดคล้องกับภาพ SEM ภาพที่ 4.2C1 C2 และภาพที่ 4.3C ตัวอย่างที่ย่อยด้วยเอนไซม์ผสม มีลักษณะรูพรุนเฉลี่ยที่แคบและลึก ส่วนตัวอย่างที่ย่อยด้วยกรดมีลักษณะเป็นหลุมที่ตื้นและกว้าง ดังภาพ SEM ภาพที่ 4.3E ดังนั้นจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า วิธีการคัดแปรที่แตกต่างกันมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรของรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนที่ต่างกัน

4.5.3 การกระจายตัวของขนาดรูพรุนของสสารก่อนและหลังการคัดแปรพื้นผิว

เมื่อนำผลการดูดซับแก๊สไนโตรเจนมาคำนวณตามวิธีของ Barret-Joyner-Halenda (BJH) (Barret et al., 1951) เพื่อหารูปแบบการกระจายตัวของรูพรุน ผลการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 4.6 จากผลการทดลองพบว่า สสารไขมันสำปะหลังดิบ มีการกระจายตัวของขนาดรูพรุนในช่วงต่ำกว่า 2 nm หรือช่วงของ micropore มากที่สุด การกระจายตัวของรูพรุนสูงสุดมีขนาด 1.64 nm นอกจากนี้ยังไม่ปรากฏการกระจายตัวในช่วงที่มากกว่า 10 nm อีกด้วย ผลที่เกิดขึ้นนี้มีความ

สอดคล้องกับการหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนด้วยวิธี BET ซึ่งตัวอย่างสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนอยู่ที่ 1.64 nm (ตารางที่ 4.3)

หลังจากการตัดแปรสตา์ชด้วยวิธีต่าง ๆ แล้ว รูขนาดเล็กระดับ micropore มีปริมาณลดลง แต่มีการกระจายตัวของขนาดรูพรุนในช่วงมากกว่า 10 nm หรือช่วงของ mesopore เพิ่มขึ้น ซึ่งการตัดแปรสตา์ชด้วยวิธีที่ต่างกันมีผลต่อการกระจายขนาดของรูพรุนแตกต่างกัน โดยตัวอย่างที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเพียงอย่างเดียว มีการกระจายขนาดรูพรุนในช่วง 10-50 nm น้อยที่สุด แต่ในช่วง 1.2-10 nm มีการกระจายขนาดรูพรุนใกล้เคียงกับตัวอย่างสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด แต่ในช่วง 10-50 nm ตัวอย่างที่ย่อยด้วยกรด มีการกระจายตัวของรูพรุนมากกว่าตัวอย่างที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเพียงอย่างเดียว และตัวอย่างที่ย่อยด้วยเอนไซม์ผสม ส่วนตัวอย่างที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเพียงอย่างเดียว มีการกระจายขนาดของรูพรุนในช่วง 1.2-10 nm และ 10-50 nm สูงที่สุดเมื่อเทียบกับการย่อยสตา์ชด้วยวิธีอื่น แต่อย่างไรก็ตามการย่อยสตา์ชด้วยกรดแล้วบดต่อด้วย ball-mill มีผลต่อการกระจายตัวของขนาดรูพรุนแตกต่างไปจากวิธีอื่น โดยมีการกระจายแบ่งออกเป็นสามช่วงคือ 1.2-10 nm 10-50 nm และมากกว่า 50 nm หรือรูพรุนแบบ macropore ซึ่งเกิดจากการที่อนุภาคขนาดเล็กที่แตกออก เนื่องจากการบดกลับมาหลอมรวมกันกลายเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้เกิดรูหรือช่องขนาดใหญ่ (pore between agglomerates of granule) (Sujka and Jamroz, 2006) ซึ่งสอดคล้องกับภาพ SEM ภาพที่ 4.2F1 F2 และภาพที่ 4.3F นั้นแสดงว่าการตัดแปรสตา์ชด้วยการใช้กรดร่วมกับ ball-mill ทำให้สตา์ชเกิดรูพรุนขนาด mesopore และ macropore ดังนั้นวิธีการตัดแปรสตา์ชที่แตกต่างกันมีผลต่อพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรของรูพรุน เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุน และการกระจายขนาดของรูพรุนแตกต่างกัน



ภาพที่ 4.6 การกระจายตัวตามขนาดของรูพรุนของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (Native starch) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส

(AMG) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสร่วมกับเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส (AA + AMG) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด (AS) และสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball-mill (ASBM)

4.6 สีของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบและสตาร์ชตัดแปรพื้นผิว

สีของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบและสตาร์ชที่ถูกตัดแปรพื้นผิว เมื่อตรวจสอบด้วยเครื่อง Hunter colorimeter และแปรผลเป็นค่าความขาวแล้ว พบว่าสตาร์ชมันสำปะหลังดิบมีค่าความขาวอยู่ที่ 98.97 และสตาร์ชที่ผ่านการตัดแปรพื้นผิวแล้ว มีค่าความขาวไม่แตกต่างไปจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ แสดงให้เห็นว่าการตัดแปรพื้นผิวสตาร์ชโดยการย่อยด้วยเอนไซม์ ย่อยด้วยกรด และการนำสตาร์ชไป ball-mill ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงไปของค่าความขาวของสตาร์ช ซึ่งค่าความขาวแสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 สีของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (Native starch) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส (AA) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสร่วมกับเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส (AA + AMG) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด (AS) และสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบด ด้วย ball-mill (ASBM)

ตัวอย่าง	ค่าความขาว
Native starch	98.97 ± 0.21 ^a
AA	98.56 ± 0.32 ^a
AMG	98.01 ± 0.15 ^a
AA + AMG	98.04 ± 0.11 ^a
AS	97.98 ± 0.22 ^a
ASBM	98.07 ± 0.26 ^a

4.7 ค่าสมมูลเดกซ์โทรส (Dextrose Equivalent; DE) ของสตาร์ชตัดแปรพื้นผิว

ค่าสมมูลเดกซ์โทรส (DE) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงระดับการถูกย่อยของสตาร์ชให้เป็นน้ำตาลกลูโคสหรือเดกซ์โทรส โดยหาได้จากการวิเคราะห์น้ำตาลรีดิวซ์ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.5 พบว่าสตาร์ชมันสำปะหลังดิบและสตาร์ชที่ถูกตัดแปรพื้นผิวด้วยเอนไซม์ทั้งแบบเดี่ยวและแบบผสม มีค่า DE ไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่การตัดแปรพื้นผิวโดยใช้กรดนั้นทำให้เกิดน้ำตาลขึ้นเป็นจำนวนมากกว่าการใช้เอนไซม์ เนื่องจากกรดสามารถย่อยได้ทั้งพันธะไกลโคไซด์ที่ตำแหน่ง

α -1, 4 และ α -1, 6 ในลักษณะไม่จำเพาะ และมีอัตราการย่อยเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังภาพที่ 4.1 ดังนั้นเมื่อย่อยสตาร์ชด้วยกรดปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่เกิดขึ้นจึงสูงกว่าการย่อยสตาร์ชด้วยเอนไซม์ เมื่อเปรียบเทียบในเวลาเท่ากัน แต่หลังจากนำสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วไปบดต่อด้วย ball-mill พบว่า ค่า DE มีค่าลดลง ทั้งนี้ เนื่องจากในกระบวนการบดมีการใช้ แอลกอฮอล์ 99% เป็นสารช่วยกระจายตัวอย่าง และหลังจากบดแล้ว มีการล้างตัวอย่างด้วยน้ำกลั่นอีกครั้งหนึ่ง ดังนั้นน้ำตาลบางส่วนจะถูกชะออกไปในระหว่างกระบวนการบดและล้าง ค่า DE ของตัวอย่างที่ย่อยด้วยกรดแล้ว บดต่อด้วย ball-mill จึงมีค่าลดลง

ตารางที่ 4.5 ค่าสมมูลเดกซ์โทรสของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (Native starch) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสร่วมกับเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA + AMG) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด (AS) และสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball-mill (ASBM)

ตัวอย่าง	DE
Native starch	0.29 ± 0.01^c
AA	0.31 ± 0.04^c
AMG	0.35 ± 0.01^c
AA + AMG	0.37 ± 0.03^c
AS	2.90 ± 0.21^a
ASBM	1.44 ± 0.06^b

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวดิ่ง หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

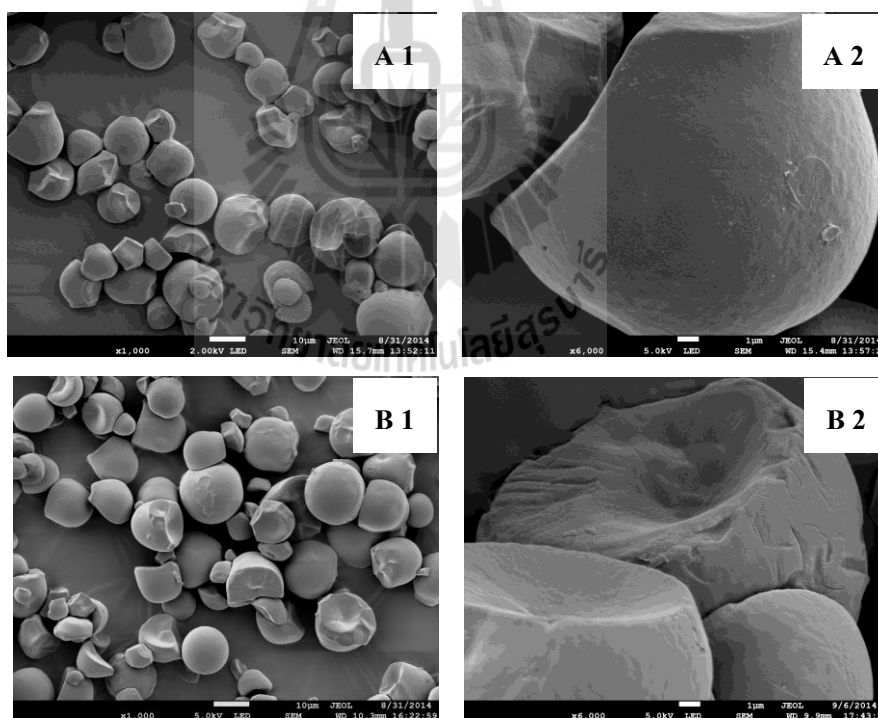
4.8 ผลของการเตรียมเดกซ์ทรินต้านทานการย่อย (Resistant Dextrin) จากสตาร์ช ดัดแปรพื้นผิวต่อคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ

สตาร์ชมันสำปะหลังดิบ และสตาร์ชที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์แบบเดี่ยว แบบผสม ย่อยด้วยกรด เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด 6 ชั่วโมง และบดต่อด้วย ball-mill เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตเป็นเดกซ์ทรินต้านทานการย่อย ด้วยวิธีเดกซ์ทรินไนเซชันหรือ pyroconversion ซึ่งเป็นการใช้ความร้อนสูงร่วมกับกรดในการดัดแปรสตาร์ชที่มีความชื้นต่ำ

4.8.1 ลักษณะรูปร่างและพื้นผิวของเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย

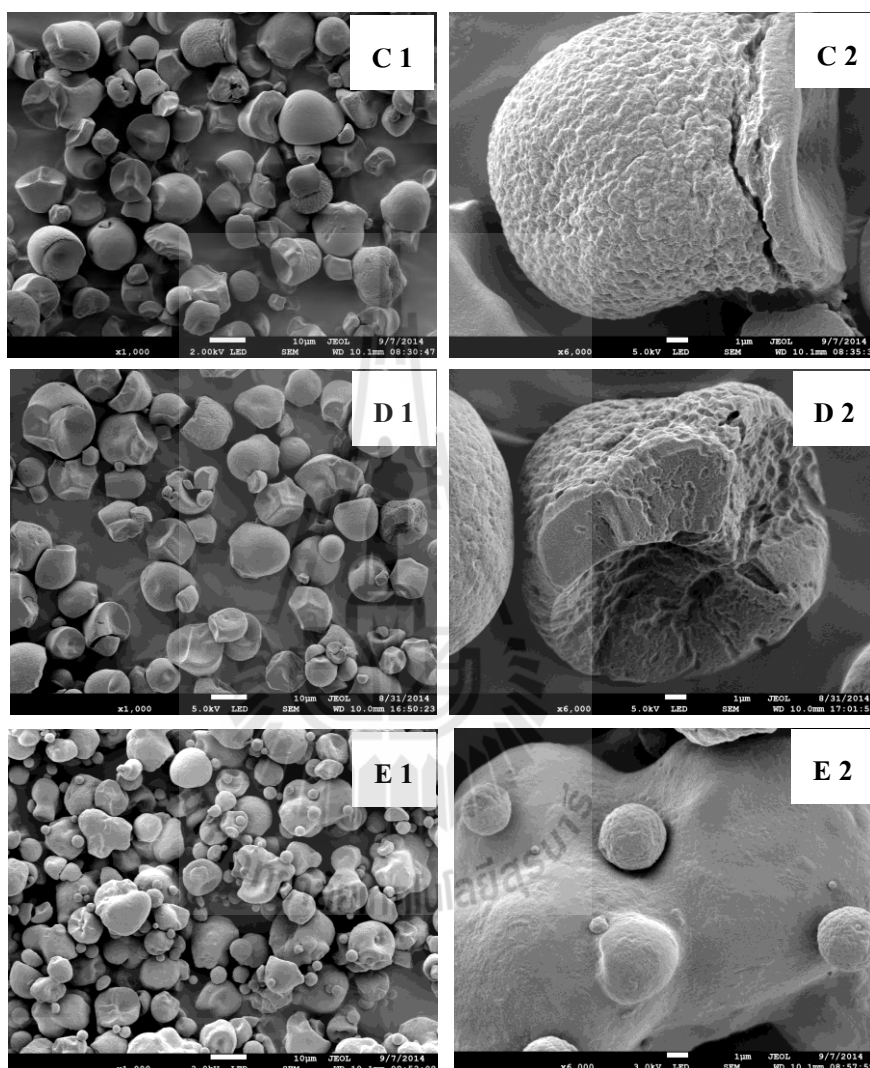
หลังจากนำสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ และสตาร์ชที่ดัดแปรพื้นผิวมาผ่านกระบวนการเดกซ์ทรินไนเซชัน เมื่อตรวจสอบลักษณะรูปร่างด้วย SEM ที่กำลังขยาย 1,000 และ 6,000 เท่า ดังแสดงในภาพที่ 4.7 พบว่า การให้ความสูงร่วมกับการใช้กรดช่วยเร่งให้เกิดปฏิกิริยาในสภาวะที่มีความชื้นต่ำนั้น ไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางลักษณะ และรูปร่างของเม็ดสตาร์ชที่ถูกนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย เมื่อเปรียบเทียบกับภาพที่ 4.2

ผลของลักษณะรูปร่างที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากก่อนการผ่านกระบวนการเดกซ์ทรินไนเซชัน มีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Laurentin et al. (2003) โดยในการศึกษาได้นำสตาร์ชต่างชนิดกันมาผ่านกระบวนการเดกซ์ทรินไนเซชัน แล้วตรวจสอบลักษณะรูปร่างของสตาร์ชก่อนและหลังผ่านกระบวนการเดกซ์ทรินไนเซชัน ซึ่งไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางลักษณะและรูปร่างของสตาร์ช แต่หลังจากนำไปละลายน้ำและทำแห้งตัวอย่างโดยการทำแห้งแบบระเหิดแห้ง (freeze dry) พบว่า ตัวอย่างมีการสูญเสียความสามารถในการคงรูปของเม็ดสตาร์ชไปอย่างรวดเร็วกลายเป็นแผ่นที่แผ่ออก (flake) และไม่กลับมารวมตัวกันอีก

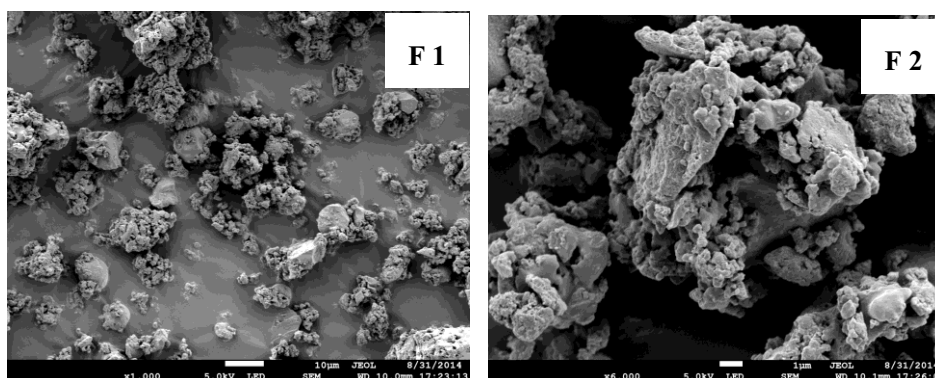


ภาพที่ 4.7 ลักษณะรูปร่างของเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยที่เตรียมจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ และสตาร์ชที่ดัดแปรด้วยวิธีต่าง ๆ ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 1,000 (1) และ 6,000 (2) เท่า: A) สตาร์ชมันสำปะหลังดิบ; B) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์

แอลฟาอะมิเลส; C) ที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส; D) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส; E) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด และ F) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดและบดด้วย ball-mill



ภาพที่ 4.7 ลักษณะรูปร่างของเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยที่เตรียมจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ และ สตาร์ชที่ตัดแปรด้วยวิธีต่าง ๆ ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 1,000 (1) และ 6,000 (2) เท่า: A) สตาร์ชมันสำปะหลังดิบ; B) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส; C) ที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส; D) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส; E) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด และ F) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดและบดด้วย ball-mill (ต่อ)



ภาพที่ 4.7 ลักษณะรูปร่างของเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยที่เตรียมจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ และ สตาร์ชที่ดัดแปรด้วยวิธีต่าง ๆ ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 1,000 (1) และ 6,000 (2) เท่า: A) สตาร์ชมันสำปะหลังดิบ; B) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์ แอลฟาอะมิเลส; C) ที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส; D) สตาร์ชที่ย่อยด้วย เอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส; E) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด และ F) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดและบดด้วย ball-mill (ต่อ)

4.8.2 ลักษณะโครงสร้างและปริมาณผลึกของเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย

ผลการตรวจสอบลักษณะ โครงสร้างและปริมาณผลึกของเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยด้วย เครื่อง X-ray diffractometer (XRD) หลังผ่านกระบวนการเดกซ์ทรินในเซชัน แสดงดังภาพที่ 4.8 พบว่า X-ray diffraction pattern ของเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย หลังผ่านกระบวนการเดกซ์ทริน-ในเซชัน ยังคงแสดงโครงสร้างผลึกเป็นแบบ A และตัวอย่างสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball-mill นั้นมีการแสดงลักษณะทางโครงสร้างผลึก แบบ A ร่วมกับแบบ V สตาร์ช เหมือนตอนเริ่มต้น แต่สิ่งที่มีการเปลี่ยนแปลงคือ พิกของทุกตัวอย่างมีความสูงลดลง นอกจากนี้ พิกคู่ (Double peak) ที่ ตำแหน่ง 2θ ที่ 10° 11° และ 17° 18° ปรากฏลักษณะที่รวมกันกลายเป็นพิกเดี่ยว ยกเว้นตัวอย่างที่ ย่อยด้วยกรดและบดด้วย ball-mill ที่ยังคงลักษณะรูปแบบของพิกไม่แตกต่างไม่จากก่อนการผ่าน กระบวนการเดกซ์ทรินในเซชัน แสดงให้เห็นว่ากระบวนการเดกซ์ทรินในเซชันไม่ก่อให้เกิดการ เปลี่ยนของรูปแบบการจัดเรียงโครงสร้างผลึกของสตาร์ชซึ่งยังคงแสดงแบบ A และแบบ A ร่วมกับ แบบ V ซึ่งผลการทดลองมีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Kwon et al. (2005) โดยการนำสตาร์ช ข้าวฟ่างข้าวเหนียว (waxy sorghum starch) มาผ่านกระบวนการเดกซ์ทรินในเซชัน และตรวจสอบ โครงสร้างผลึกแล้วพบว่า ลักษณะของรูปแบบของ X-ray diffraction ยังคงแสดงเป็นแบบ A แต่ ความสูงของพิกที่เกิดขึ้นนั้นลดลง นอกจากนี้ Yanjie et al. (2014) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลง

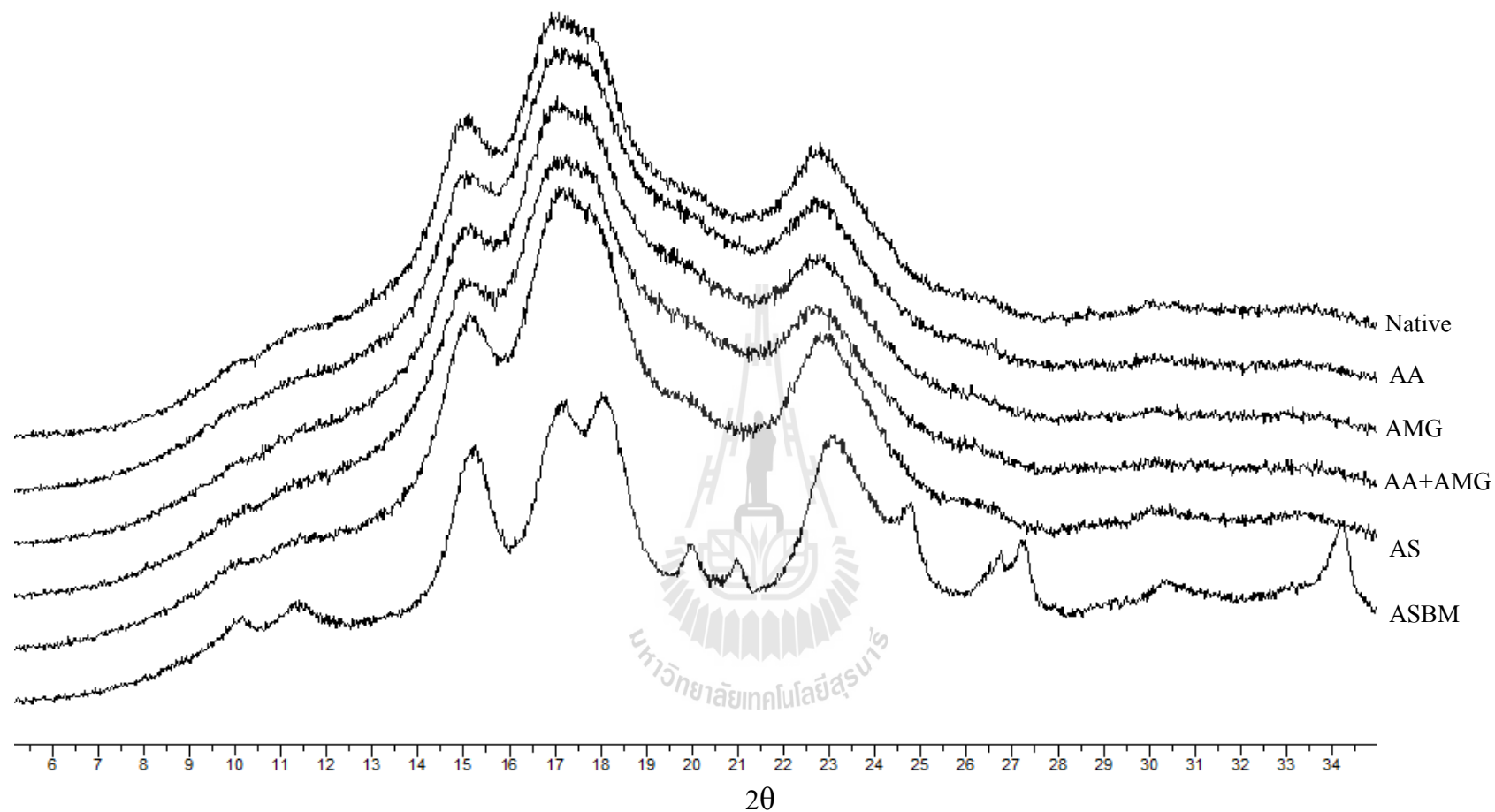
โครงสร้างของสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวในระหว่างการให้ความร้อนของกระบวนการเดกซ์ทรินไนเซชัน พบว่าบริเวณผลึกของสตาร์ชมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยปริมาณและขนาดของผลึกจะลดลงเมื่อให้ความร้อนเป็นเวลานานขึ้น แต่การจัดเรียงตัวของโครงสร้างในแนวรัศมีของสตาร์ชโมเลกุลไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปในระหว่างกระบวนการเดกซ์ทรินไนเซชัน เพราะเมื่อตรวจสอบภายใต้กล้องโพลาไรซ์ยังปรากฏลักษณะของ birefringence อย่างชัดเจน

เมื่อคำนวณปริมาณผลึกของตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการเดกซ์ทรินไนเซชันแล้ว พบว่าทุกตัวอย่างมีปริมาณผลึกลดลง สอดคล้องกับการศึกษาของ Laurentin et al. (2003); Kwon et al. (2005) และ Yanjie et al. (2014) โดยปริมาณผลึกแสดงดังตารางที่ 4.4 ซึ่งตัวอย่างที่ตัดแปรพื้นผิวโดยการย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณผลึกมากที่สุด รองลงมาคือตัวอย่างที่มีการตัดแปรพื้นผิวโดยใช้กรด แสดงให้เห็นว่าการตัดแปรพื้นผิวของสตาร์ชด้วยการใช้เอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสและการใช้กรดก่อนนำมาเตรียมเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย ส่งผลให้กรดและความร้อนในกระบวนการเดกซ์ทรินไนเซชัน สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับโครงสร้างผลึกของสตาร์ชได้มากกว่าการตัดแปรพื้นผิวด้วยวิธีอื่น

ตารางที่ 4.6 ปริมาณผลึกของเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย หลังกระบวนการเดกซ์ทรินไนเซชันของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (Native starch dextrin) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AA + AMG) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด (AS) และสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดและบดด้วย ball-mill (ASBM)

ตัวอย่าง	ปริมาณผลึก (%)	*ปริมาณการเปลี่ยนแปลงของผลึก (%)
Native starch dextrin	20.27 ± 0.08 ^c	17.53
AA	20.68 ± 0.08 ^c	6.97
AMG	18.46 ± 0.45 ^d	27.15
AA + AMG	18.17 ± 0.13 ^d	16.96
AS	26.02 ± 0.68 ^b	25.40
ASBM	30.74 ± 0.38 ^a	1.00

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)



ภาพที่ 4.8 ลักษณะโครงสร้างผลึกของเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยที่ผลิตจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (Native); สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA); สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG); สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AA + AMG); สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด (AS); และสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball-mill (ASBM)

ตัวอย่างที่ตัดแปรพื้นผิวโดยใช้กรดและบดด้วย ball-mill มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณผลิตภัณฑ์สุดท้ายหลังผ่านกระบวนการเดกซ์ทรินไนเซชัน ซึ่งสาเหตุอาจเกิดจากอนุภาคนาโนเล็กของสตาร์ชหลังการบดแล้วกลับมารวมตัวกันใหม่นั้น หันส่วนของผลิตภัณฑ์ออกมาด้านนอก (ภาพที่ 4.7F1 และ F2) ทำให้ยากต่อการถูกย่อยด้วยกรด (hydrolysis) และการสลายพันธะด้วยความร้อน (pyrolysis) ในกระบวนการเดกซ์ทรินไนเซชัน จึงทำให้ปริมาณผลิตภัณฑ์มีการเปลี่ยนแปลงไปน้อยที่สุด

4.8.3 สีของเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย

ค่าความขาว (Whiteness) ของเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยที่ผลิตจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ และตัดแปรพื้นผิวด้วยวิธีการต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 4.7 โดยสตาร์ชมันสำปะหลังดิบเริ่มต้นที่ยังไม่ผ่านกระบวนการตัดแปรใด ๆ มีค่าความขาวอยู่ที่ 98.87 แต่เมื่อนำสตาร์ชสำปะหลังดิบและสตาร์ชที่ตัดแปรพื้นผิวมาเตรียมเป็นเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย โดยผ่านการให้ความร้อนสูง ร่วมกับการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแล้ว พบว่าความขาวของเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยมีค่าลดลง ซึ่งการศึกษาของ Laurentin et al. (2003) และ Campechano et al. (2007) ได้อธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงของสีหลังกระบวนการเดกซ์ทรินไนเซชันว่า การเปลี่ยนแปลงของสีนั้นขึ้นอยู่กับสภาวะของกระบวนการเดกซ์ทรินไนเซชันโดยตรง หากสภาวะในการผลิตรุนแรง (ใช้กรดเข้มข้น ความร้อนสูง และให้ความร้อนเป็นเวลานาน) ก็จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความขาวลดลง และสีที่เข้มขึ้น อาจเป็นส่วนที่กลายเป็นถ่าน (char) และสีน้ำตาลที่เกิดจากปฏิกิริยาคาราเมลไลเซชัน (Caramelization reaction) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการให้ความร้อนแก่น้ำตาลในสภาวะที่ไม่มีการประกอบในโตรเจน ซึ่งพอลิเมอร์ของน้ำตาลจะเกิดการสลายตัว เนื่องจากความร้อน แล้วมีการสูญเสียน้ำ (dehydration) เกิดขึ้น จากนั้นจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ ได้เป็น 3-deoxy-D-glucosone (Scarpellino and Soukup, 1993) น้ำตาลที่เกิดปฏิกิริยาคาราเมลไลเซชันโดยทั่วไปจะมีโครงสร้างอยู่ในรูปของน้ำตาลมอโนแซ็กคาไรด์ โดยขั้นตอนแรกของปฏิกิริยาจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ภายในโมเลกุล (intramolecular rearrangements) ซึ่งหมู่อัลดีไฮด์หรือคีโตน และหมู่ไฮดรอกซิลจะเกิดปฏิกิริยากันเองภายในสายโมเลกุลเดียวกัน นอกจากนี้จะมีการปลดปล่อยไฮโดรเจนไอออน (H^+) ทำให้ค่าพีเอชลดลง เกิดเป็นสารประกอบคาร์บอนิลซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการเกิดสีน้ำตาล กลิ่นคาราเมล และยังเกี่ยวข้องกับเกิดสารประกอบเฮเทอโรไซคลิก ได้แก่ HMF HDF (hydroxysimethyl furanone) และ HAF (hydroxyacetyl furan) (Coca et al., 2004)

ดังนั้นค่าความขาวของตัวอย่างที่ตัดแปรพื้นผิวสตาร์ชโดยใช้เอนไซม์และกรดก่อน นำมาผ่านกระบวนการเดกซ์ทรินไนเซชันมีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่าการตัดแปรพื้นผิวของสตาร์ชโดยใช้เอนไซม์และการใช้กรดนั้น เป็นการเพิ่มความรุนแรงของสภาวะการผลิตทางหนึ่ง โดยไม่ต้องเพิ่มความเข้มข้นของกรด หรือเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อนในกระบวนการเดกซ์ทรินไนเซชัน ส่วนตัวอย่างเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยที่ผลิตจากสตาร์ชสำปะหลังดิบ มีค่า

ความขาวลดลงไปเพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่า กระบวนการเดกซ์ทรินในเซชัน เกิดขึ้นได้ไม่รุนแรงเมื่อเทียบกับตัวอย่างสตาร์ชที่ตัดแปรพื้นผิวโดยการใช้เอนไซม์และกรดก่อนการนำมาผลิตเป็นเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย แต่อย่างไรก็ตาม การตัดแปรพื้นผิวให้มีขนาดเล็กและสูญเสียรูปร่างความเป็นแกรนูลของสตาร์ชไปโดยการตัดแปรพื้นผิวสตาร์ชด้วยการย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball-mill นั้น ส่งผลให้กระบวนการเดกซ์ทรินในเซชันเกิดขึ้นได้ไม่ดี หรือเกิดขึ้นได้น้อยมาก ค่าความขาวจึงลดลงไปเพียงเล็กน้อยและมีค่าความขาวไม่แตกต่างจากการเตรียมเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ

ตารางที่ 4.7 ค่าความขาวของเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยที่ผลิตจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (Native starch dextrin) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AA + AMG) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด (AS) และสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball-mill (ASBM)

ตัวอย่าง	ค่าความขาว
Native starch ¹	98.97 ± 0.21 ^a
Native starch dextrin	95.17 ± 0.89 ^b
AA	70.13 ± 0.09 ^d
AMG	70.92 ± 0.09 ^d
AA + AMG	70.68 ± 0.41 ^d
AS	72.58 ± 0.96 ^c
ASBM	95.95 ± 0.72 ^b

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

¹Native หมายถึง สตาร์ชมันสำปะหลังดิบที่ไม่ผ่านกระบวนการใด ๆ

4.8.4 ค่าสมมูลเดกซ์โทรส (Dextrose Equivalent; DE) ของเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย

จากผลการทดลอง เมื่อนำสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ และสตาร์ชตัดแปรพื้นผิว มาผลิตเป็นเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยแล้ว พบว่า ค่า DE ของเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยมีค่าเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 4.8) เมื่อเทียบกับ ค่า DE ของสตาร์ชก่อนเตรียมเป็นเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย (ตารางที่ 4.5) เนื่องจากสตาร์ชจะถูกย่อยด้วยกรดและความร้อนในระหว่างกระบวนการเดกซ์ทรินในเซชัน ทำให้โมเลกุลของสตาร์ชมีขนาดเล็กลง และบางส่วนถูกย่อยกลายเป็นน้ำตาลเพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของ

น้ำตาลที่เกิดในระหว่างกระบวนการเดกซ์ทริไนเซชันเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดปรากฏการณ์การลามไลเซชัน หรือการเกิดสีน้ำตาลจากการให้ความร้อนสูงกับน้ำตาล โดยความร้อนสูงจะทำให้เกิดการสลายโมเลกุลของน้ำตาลให้แยกออกจากกัน และจากนั้นเกิดพอลิเมอร์เซชันของสารประกอบคาร์บอนได้เป็นสารสีน้ำตาลขึ้น โดยปฏิกิริยาการลามไลเซชันจะเกิดขึ้นได้ต้องมีน้ำตาลเป็นสารเริ่มต้นเท่านั้น (นิตยา, 2545) ซึ่งสอดคล้องกับค่าความขาวที่มีค่าลดลงเมื่อนำสตาร์ชมาเตรียมเป็นเดกซ์ทรินด้านการย่อย (ตารางที่ 4.7) แต่จากตารางที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าค่า DE ของเดกซ์ทรินด้านการย่อยที่เตรียมจากสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball-mill มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.44 เป็น 1.47 ซึ่งมีการเพิ่มขึ้นของค่า DE เพียงเล็กน้อยเท่านั้น แสดงให้เห็นว่าสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball-mill เกิดการย่อยด้วยกรดและความร้อนได้ไม่ดีเมื่อเทียบกับเดกซ์ทรินด้านการย่อยที่เตรียมจากการคัดแปรพื้นผิวสตาร์ชด้วยวิธีอื่น เนื่องจากลักษณะของเม็ดสตาร์ชที่สูญเสียความเป็นเกรนูลไปไม่เหมาะต่อการเกิดเดกซ์ทรินด้านการย่อย การเปลี่ยนแปลงของค่า DE จึงเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้อาจเป็นสาเหตุหนึ่งของการเปลี่ยนแปลงไปของค่าความขาวของเดกซ์ทรินด้านการย่อยที่เตรียมจากสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball-mill นั้น มีการเปลี่ยนแปลงไปต่ำที่สุดอีกด้วย

ตารางที่ 4.8 ค่าสมมูลเดกซ์โทรสของเดกซ์ทรินด้านการย่อยที่ผลิตจากสตาร์ชมันสำปะหลัง-ดิบ (Native starch dextrin) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AA + AMG) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด (AS) และสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball-mill (ASBM)

ตัวอย่าง	ค่าสมมูลเดกซ์โทรส
Native starch dextrin	1.99 ± 0.03^b
AA	2.00 ± 0.12^b
AMG	1.63 ± 0.06^d
AA + AMG	2.11 ± 0.09^c
AS	3.61 ± 0.05^a
ASBM	1.47 ± 0.09^e

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

4.8.5 การละลายน้ำของเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย

ผลการทดสอบการละลายน้ำของเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย ที่อุณหภูมิห้อง พบว่าตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการเดกซ์ทรินไนเซชัน มีความสามารถในการละลายน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ ที่ไม่ผ่านกระบวนการใดๆ ซึ่งสามารถละลายน้ำได้เพียง 0.81%

การเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างในระดับโมเลกุลของสตาร์ช ในระหว่างกระบวนการเดกซ์ทรินไนเซชันนั้นประกอบด้วย 3 ปฏิกริยาหลัก ๆ ที่สำคัญคือ การย่อย (hydrolysis) การจัดพันธะของกลูโคสใหม่ (transglucosidation) และการเกิดพอลิเมอร์ใหม่ (repolymerization) ของกลูแคน (Wurzburg, 1986; Huber and BeMiller, 2009) การลดลงของน้ำหนักโมเลกุลของสตาร์ชอย่างต่อเนื่องโดยอิทธิพลของกรดและความร้อน ส่งผลให้ความสามารถในการละลายน้ำเพิ่มขึ้น (Wurzburg, 1986; Laurentin et al., 2004) จากผลการทดลอง แสดงดังตารางที่ 4.9 พบว่า หลังจากนำสตาร์ชมาเตรียมเป็นเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยแล้ว สตาร์ชมันสำปะหลังดิบ สามารถละลายน้ำได้ดีที่สุดคือ 93.39% อาจเกิดจากการลดลงของน้ำหนักโมเลกุลโดยการถูกย่อยด้วยกรด (hydrolysis) และความร้อน (pyrolysis) ที่เกิดขึ้นและไม่มีส่วนของถ่านที่เกิดจากความรุนแรงของสภาวะการผลิตเกิดขึ้น เมื่อพิจารณาประกอบกับค่าความขาว (ตารางที่ 4.7)

ตารางที่ 4.9 ความสามารถในการละลายน้ำของเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยที่ผลิตจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (Native starch dextrin) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AA + AMG) สตาร์ชที่ย่อยด้วย (AS) และสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball-mill (ASBM)

ตัวอย่าง	การละลาย (%)
Native starch ¹	0.81 ± 0.36 ^c
Native starch dextrin	93.39 ± 0.05 ^a
AA	85.62 ± 0.49 ^b
AMG	85.43 ± 0.50 ^b
AA + AMG	84.98 ± 0.42 ^b
AS	77.85 ± 0.62 ^c
ASBM	23.40 ± 0.21 ^d

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$); ¹Native หมายถึง สตาร์ชมันสำปะหลังดิบที่ไม่ผ่านกระบวนการใด ๆ

ส่วนสตาร์ชที่ตัดแปรพื้นผิวด้วยเอนไซม์ทั้งแบบเดี่ยวและแบบผสมเมื่อนำมาเตรียมเป็น เดกซ์ทรินด้านทานการย่อยแล้วมีการละลายน้ำไม่แตกต่างกัน และตัวอย่างที่ตัดแปรพื้นผิวโดยใช้ กรดมีการละลายน้อยกว่าการใช้เอนไซม์และตัวอย่างที่ไม่มีการตัดแปรพื้นผิว ตามรายงานการศึกษา ของ Kwon et al. (2005) ได้กล่าวไว้ว่า ความสามารถในการละลายน้ำที่ลดลงของเดกซ์ทริน อาจเกิด จากการเกิดพอลิเมอร์ใหม่ของสารที่ไม่ใช่สตาร์ช (non-starch) เช่น บางส่วนที่เกิดการไหม้กลายเป็น ถ่าน (char) ในระหว่างการให้ความร้อนที่สูงและเป็นเวลานาน ซึ่งสอดคล้องกับค่าความขาวที่ลดลง (ตารางที่ 4.7) นอกจากนี้ตัวอย่างสตาร์ชที่ตัดแปรพื้นผิวด้วยกรดแล้วบดต่อด้วย ball-mill นั้น มี ความสามารถในการละลายน้ำต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยตัวอื่น ทั้งนี้อาจเกิด จากตัวอย่างสตาร์ชที่ตัดแปรพื้นผิวด้วยกรดแล้วบดต่อด้วย ball-mill อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงของ ปฏิกริยาทางเคมีในกระบวนการเดกซ์ทรินไนเซชันได้ไม่ดี โดยดูได้จากปริมาณผลึกที่มีการ เปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยหลังกระบวนการเดกซ์ทรินไนเซชัน (ตารางที่ 4.6) ซึ่งนอกจากปริมาณ ผลึกที่ลดลงไปเพียงเล็กน้อยแล้ว ปริมาณผลึกคงเหลือยังมากที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างอื่น อาจ เป็นไปได้ว่าปริมาณของผลึกและขนาดโมเลกุลของสตาร์ชที่เปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยส่งผลให้ ความสามารถในการละลายน้ำของตัวอย่างสตาร์ชที่ตัดแปรพื้นผิวด้วยกรดแล้วบดต่อด้วย ball-mill มีความสามารถในการละลายต่ำกว่าตัวอย่างที่ตัดแปรพื้นผิวด้วยวิธีอื่น ผลการทดลองสอดคล้องกับ การศึกษาของ Yanjie et al. (2014) ซึ่งพบว่าปริมาณคงเหลือของผลึกหลังกระบวนการเดกซ์ทริน ไนเซชันมีต่อการละลายน้ำของเดกซ์ทริน

4.8.6 ปริมาณใยอาหารของเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย

ปริมาณใยอาหารของเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย ตรวจวัดตามวิธีของ AOAC 2009.01 และ 2011.25 ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ปริมาณใยอาหารทั้งหมดรวมถึงแป้งด้านทาน (Resistant Starch; RS) และสารจำพวกโอลิโกแซคคาไรด์ที่ไม่ถูกย่อย (Non-digestible oligosaccharide; NDO) ที่มีระดับขึ้นการเกิดพอลิเมอร์ (Degree of polymerization; DP) มากกว่า 3 หน่วยขึ้นไป ส่วนของใยอาหารที่ละลายน้ำได้มวลโมเลกุลสูง (High molecular weight soluble dietary fiber; HMWDF) จะถูกดักตะกอนในแอลกอฮอล์ กรองและชั่งน้ำหนัก หลังจากนั้นส่วนของ ใยอาหารที่ละลายน้ำได้มวลโมเลกุลต่ำ (Low molecular weight soluble dietary fiber; LMWDF) ที่ ผ่านการกรองจะถูกนำไปวิเคราะห์ปริมาณใยอาหารด้วย HPLC แล้วนำทั้งสองส่วนมารวมกันเป็น ปริมาณใยอาหารทั้งหมด (Total dietary fiber; TDF)

ผลการวิเคราะห์ปริมาณใยอาหารแสดงดังตารางที่ 4.10 จากผลการทดลองพบว่า สตาร์ชที่ ผ่านกระบวนการเดกซ์ทรินไนเซชัน มีปริมาณใยอาหารเพิ่มขึ้นจากปริมาณใยอาหารเริ่มต้นเป็น อย่างมาก โดยสตาร์ชมันสำปะหลังดิบที่ไม่ผ่านกระบวนการใด ๆ มีปริมาณใยอาหารเพียง 2.44% และยังไม่พบว่ามีใยอาหารมวลโมเลกุลต่ำอีกด้วย

หลังจากนำสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ และสตาร์ชที่ถูกตัดแปรพื้นผิวด้วยวิธีการต่าง ๆ มาเตรียมเป็นเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย ด้วยวิธีการเดกซ์ทรินไนเซชัน พบว่าทุกตัวอย่างมีปริมาณใยอาหารเพิ่มขึ้นทั้งส่วนของใยอาหารที่ละลายน้ำได้ มวลโมเลกุลสูง และมวลโมเลกุลต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากในระหว่างกระบวนการเดกซ์ทรินไนเซชันสตาร์ชจะถูกตัดแปรในสภาวะที่ใช้อุณหภูมิสูง และมีความชื้นต่ำประมาณ 5% นอกจากนี้ยังมีการกระตุ้นปฏิกิริยาโดยการเติมกรดลงไปในตัวอย่่าง และหลังจากให้ความร้อนจนครบเวลาตัวอย่างจะถูกทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ในตอนเริ่มต้นของกระบวนการเดกซ์ทรินไนเซชัน โมเลกุลของสตาร์ชจะถูกย่อยแบบสุ่มโดยกรดและความร้อนที่พันธะ α 1-4 และ α 1-6 พอลิเมอร์ของสตาร์ชจะถูกตัดให้เป็นโอลิโกแซ็กคาไรด์สายสั้น ๆ (short-chain oligosaccharide) ในระหว่างนี้น้ำหนักโมเลกุลของสตาร์ชจะลดลงอย่างต่อเนื่อง จากนั้นจะกลับมาเกิดเป็นพอลิเมอร์ใหม่ในขณะที่ทำให้เย็น พันธะไกลโคซิดิกที่ไม่ถูกย่อย (non-digestible glycosidic bonds) เช่น β 1-4 β 1-6 α และ β 1-3 1-2 จะถูกผลิตในช่วงนี้ ดังนั้นโครงสร้างของเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย จะมีกึ่งกันมากกว่าสตาร์ช (Wurzburg, 1986) ซึ่งการกลับมาจัดเรียงตัวกันใหม่ของเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย แสดงดังภาพที่ 2.11A

ตารางที่ 4.10 ปริมาณใยอาหารที่ละลายน้ำได้ มวลโมเลกุลสูง (HMWDF) มวลโมเลกุลต่ำ (LMWDF) และปริมาณใยอาหารทั้งหมด (TDF) ของเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยที่ผลิตจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (Native starch dextrin) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AA + AMG) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด (AS) และสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball-mill (ASBM)

ตัวอย่าง	HMWDF	LMWDF	TDF
Native starch ¹	2.44 ± 0.10^c	nd	2.44 ± 0.10^f
Native starch dextrin	9.72 ± 1.92^d	35.38 ± 1.78^b	45.10 ± 0.14^d
AA	26.67 ± 0.18^b	32.32 ± 0.58^c	58.99 ± 0.40^b
AMG	31.57 ± 1.99^a	33.01 ± 1.88^c	64.58 ± 0.11^a
AA + AMG	26.03 ± 0.29^b	30.62 ± 1.23^d	56.65 ± 0.94^c

ตารางที่ 4.10 ปริมาณใยอาหารที่ละลายน้ำได้มวลโมเลกุลสูง (HMWDF) มวลโมเลกุลต่ำ (LMWDF) และปริมาณใยอาหารทั้งหมด (TDF) ของเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยที่ผลิตจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (Native starch dextrin) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AA + AMG) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด (AS) และสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball-mill (ASBM) (ต่อ)

ตัวอย่าง	HMWDF	LMWDF	TDF
AS	21.38 ± 1.22 ^c	37.64 ± 1.32 ^a	59.01 ± 0.10 ^b
ASBM	10.28 ± 0.04 ^d	2.02 ± 1.37 ^c	12.30 ± 1.41 ^c

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวดิ่ง หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$); ¹Native หมายถึง สตาร์ชมันสำปะหลังดิบที่ไม่ผ่านกระบวนการใด ๆ; nd หมายถึง ตรวจสอบไม่พบ

จากตารางที่ 4.10 พบว่า ตัวอย่างที่ตัดแปรพื้นผิวด้วยเอนไซม์แบบเดี่ยว แบบผสม และการใช้กรด เมื่อนำมาเตรียมเป็นเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยแล้ว มีปริมาณใยอาหารมากกว่าตัวอย่างที่เตรียมจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ ซึ่งส่วนของใยอาหารที่ละลายน้ำได้มวลโมเลกุลสูงของตัวอย่างที่ตัดแปรพื้นผิวโดยใช้เอนไซม์และกรดนั้น มีปริมาณมากกว่าเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยสตาร์ชที่เตรียมจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่าการตัดแปรพื้นผิวมีผลทำให้เกิดเป็นเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยที่มีน้ำหนักมวลโมเลกุลสูงมากกว่าตัวอย่างที่ไม่มีการตัดแปรพื้นผิวก่อนนำมาเตรียมเป็นเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย

การตัดแปรพื้นผิวของสตาร์ชก่อนนำมาเตรียมเป็นเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย ส่งผลให้ปริมาณใยอาหารเพิ่มขึ้นในทุกตัวอย่าง ทั้งนี้ปริมาณใยอาหารที่ละลายน้ำได้มวลโมเลกุลต่ำจะมีปริมาณมากกว่าปริมาณใยอาหารที่ละลายน้ำได้มวลโมเลกุลสูง แสดงให้เห็นว่ากระบวนการเดกซ์ทรินในเซชันทำให้เกิดพอลิเมอร์ของสตาร์ชที่ละลายน้ำได้และต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ที่มีน้ำหนักมวลโมเลกุลต่ำมากกว่าพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักมวลโมเลกุลสูง ยกเว้นตัวอย่างที่ตัดแปรโดยใช้กรดแล้วบดด้วย ball-mill ซึ่งเป็นการตัดแปรสตาร์ชในสภาวะที่รุนแรงจนสูญเสียลักษณะความเป็นเม็ดสตาร์ชไปกลายเป็นเศษชิ้นส่วนที่มีอนุภาคขนาดเล็ก (small particle) ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าการตัดแปรสตาร์ชให้มีอนุภาคขนาดเล็กนั้น ทำให้โครงสร้างของสตาร์ชไม่เหมาะสมต่อการเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในระหว่างกระบวนการเดกซ์ทรินในเซชัน โดยอาจเกิดการย่อยด้วยกรด

และการย่อยด้วยความร้อนได้ไม่ดี ซึ่งดูได้จากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณผลึกที่เกิดขึ้นน้อยมาก เมื่อเทียบกับ ปริมาณผลึกก่อนผ่านกระบวนการเดกซ์ทรินไนเซชัน และปริมาณใยอาหารหลังจากผ่านกระบวนการเดกซ์ทรินไนเซชัน ของตัวอย่างสตาร์ชที่ดัดแปรพื้นผิวโดยใช้กรดแล้วบดด้วย ball-mill นั้นมีปริมาณน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยที่เตรียมจากสตาร์ชที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า แสดงให้เห็นว่าการจัดพันธะของกลูโคสใหม่ (transglucosidation) และการเกิดพอลิเมอร์ใหม่ (repolymerization) ซึ่งจะทำให้เกิดพันธะใหม่ที่ทนต่อการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ นั้นเกิดขึ้นได้น้อย จึงส่งผลให้ปริมาณใยอาหารมีปริมาณน้อยกว่าตัวอย่างเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยที่เตรียมจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ และตัวอย่างสตาร์ชที่ดัดแปรพื้นผิวด้วยวิธีการอื่น ๆ

ตัวอย่างที่มีปริมาณใยอาหารมากที่สุดหลังจากการเตรียมเป็นเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยคือ ตัวอย่างที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเพียงอย่างเดียว ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าพื้นที่ผิว และลักษณะความพรุนของเม็ดสตาร์ชหลังการดัดแปร มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในระหว่างกระบวนการเดกซ์ทรินไนเซชันเกิดขึ้นได้ดี โดยอาจมีพื้นที่ผิว ความพรุน และขนาดของโมเลกุลสตาร์ชเหมาะต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีในระหว่างกระบวนการเดกซ์ทรินไนเซชัน จึงเกิดการจับพันธะของกลูโคสใหม่ และเกิดพอลิเมอร์ใหม่ที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณใยอาหารได้ดีกว่าการดัดแปรพื้นผิวด้วยวิธีการอื่น ๆ



บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา

การตัดแปรพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชโดยใช้เอนไซม์และกรด สามารถเพิ่มพื้นที่ผิวของสตาร์ชได้ และสตาร์ชยังคงความเป็นแกรนูลอยู่ ซึ่งการตัดแปรเม็ดสตาร์ชโดยการย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส สามารถตัดแปรเม็ดสตาร์ชให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด เมื่อเทียบกับการใช้เอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเพียงอย่างเดียว หรือการใช้เอนไซม์ผสมระหว่างเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส และการใช้กรด เมื่อนำสตาร์ชที่ตัดแปรพื้นผิวด้วยเอนไซม์และกรดมาเตรียมเป็นเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยพบว่า พื้นที่ผิวของสตาร์ชที่เพิ่มขึ้นจากการตัดแปรด้วยการใช้เอนไซม์และกรด มีปริมาณใยอาหารสูงกว่าการผลิตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ โดยเฉพาะการตัดแปรพื้นผิวสตาร์ชด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส เมื่อนำมาผลิตเป็นเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยแล้ว มีปริมาณใยอาหารสูงที่สุด

การตัดแปรพื้นผิวของเม็ดสตาร์ช โดยการนำสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดมาบดต่อด้วย ball-mill พบว่า สตาร์ชมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นมากที่สุด แต่สตาร์ชสูญเสียความเป็นแกรนูลไป กลายเป็นเศษชิ้นส่วนขนาดเล็ก เมื่อนำมาผลิตเป็นเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยแล้ว ปริมาณใยอาหารที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำที่สุด



รายการอ้างอิง

รายการอ้างอิง

- กล้านรงค์ ศรีวรรต และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. (2543). **เทคโนโลยีของแป้ง**. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์ กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 292 หน้า.
- นิติ เดิมเวชยานนท์. (2543). **การดัดแปรแป้งมันสำปะหลังด้วยวิธี Ball Mill และศึกษาสมบัติของ แป้งดัดแปร**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- นิธิยา รัตนานนท์. (2545). **เคมีอาหาร**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์. 504 หน้า.
- ประสงค์ เทียนบุญ. (2557). **ใยอาหาร**. หน่วยโภชนศาสตร์และศูนย์วิจัยโภชนาการ คณะ แพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. หน้า 1-6.
- วีระยุทธ์ ลอประยูร. (2546). **เอกสารประกอบรายวิชา Powder Technology**. มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี
- Amparo, L. R., Flanagan, B. M., Gilbert, E. P., and Gidley, M. J. (2008). A novel approach for calculating starch crystallinity and its correlation with double helix content: A combined XRD and NMR study. **Biopolymer**. 89(9): 761-768.
- AOAC Official Method 2011.25. (2012). Integrated total dietary fibre assay procedure including resistant starch and non-digestible oligosaccharide. **Official Methods of Analysis of AOAC International**. 1-23.
- Apinan, S., Yujiro, I., Hidefumi, Y., Takeshi, F., Myllarinen, P., Forssell, P., and Poutanen, K. (2007). Visual observation of hydrolyzed potato starch granules by alpha-amylase with confocal laser scanning microscopy. **Starch/Stärke**. 59(11): 543-548.
- Atichokudomchai, N., Shobsngob, S., and Varavinit, S. (2000). Morphological properties of acid modified tapioca starch. **Starch/Stärke**. 52: 283-289.
- Baldwin, P. M., Adler, J., Davies, M. C., and Melia, C. D. (1998). High resolution imaging of starch granule surfaces by atomic force microscopy. **Journal of Cereal Science**. 27(3): 255-265.
- Baldwin, P. M., Adler, J., Davies, M. C., and Melia, C. D. (1994). Holes in starch granules: confocal, SEM and light microscopy studies of starch granule structure. **Starch/Stärke**. 46: 341-346.

- Barret, E. P., Joyner, L. G., and Hallenda, P. P. (1951). The determination of pore volume and area distributions in porous substances. I. computations from nitrogen isotherms. **Journal of the American Chemical Society**. 73: 373-380.
- Brimhall, B. (1944). Structure of pyrodextrins. **Industrial and Engineering Chemistry**. 36: 72-75.
- Buléon, A., Bizot, H., Delage, M. M., and Pontoire, B. (1987). Comparison of X-ray diffraction patterns and sorption properties of the hydrolysed starches of potato, wrinkled and smooth pea, broad bean and wheat. **Carbohydrate Polymers**. 7: 461-482.
- Buléon, A., Colonna, P., Planchot, V., and Ball, S. (1998b). Starch granules: Structure and biosynthesis. **International Journal of Biological Macromolecules**. 23: 85-112.
- Bulfer, A. J., and Gapen, C. C. (1942). Production of dextrin from starch. US 2287599 A.
- Calorina, M. C., and Franco, C. M. L. (2010). Effect of acid-ethanol treatment followed by ball milling on structural and physicochemical characteristics of cassava starch. **Starch/Stärke**. 62: 236-245.
- Campanha, R. B., and Franco, C. M. L. (2011). Gelatinization properties of native starches and their Naegeli dextrins. **Journal of Thermal Analysis Calorimetry**. 106: 799-804.
- Campechano-Carrera, E., Corona-Cruz, A., Chel-Guerrero, L., and Betancur-Ancona, D. (2007). Effect of pyrodextrinization on available starch content of Lima bean (*Phaseolus lunatus*) and cowpea (*Vigna unguiculata*) starches. **Food Hydrocolloids**. 21: 472-479.
- Castro, L., and Aguilera, J. M. (2007). Fracture properties and microstructure of low moisture starch probes. **Drying Technology**. 25(1-3): 147-152.
- Cavallini, C. M., and Franco, C. M. L. (2010). Effect of acid-ethanol treatment followed by ball milling on structural and physicochemical characteristics of cassava starch. **Starch/Stärke**. 62: 236-245.
- Chen, Y. S., Huang, S. R., Tang, Z. F., Chen, X. W., and Zhang, Z. F. (2011). Structural changes of cassava starch granules hydrolyzed by a mixture of alpha-amylase and glucoamylase. **Carbohydrate Polymers**. 85(1): 272-275.
- Coca, M., Garcia, M. T., Gonzalez, G., Pena, M., and Garcia, J. A. (2004). Study of coloured components formed in sugar beet processing. **Food Chemistry**. 86: 421-433.
- Copeland, L., Blazek, J., Salman H., and Tang, M. C. M. (2009). Form and function of starch granules. **Food Hydrocolloids**. 23: 1527-1534.

- Daniel, J. R., and Whistler, R. L. (1990). Fatty sensory qualities of polysaccharides. **Cereal Foods World**. 35: 825.
- Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A., and Smith, F. (1956). Colorimetric method for the determination of sugars and related substances. **Analytical Chemistry**. 56: 427-429.
- Fabiano, J. C., Figueira, J. A., Kawaguti, H. Y., Fernandes, P. C. B., Carvalho, P. O., Nascimento, M. G., and Sato, H. H. (2013). Potential applications of carbohydrases immobilization in the food industry. **International Journal of Molecular Sciences**. 14: 1335-1369.
- Fannon, J. E., Gray, J. A., Gunawan, N., Huber, K. C., and BeMiller, J. N. (2004). Heterogeneity of starch granules and the effect of granule channelization on starch modification. **Cellulose**. 11: 247-254.
- Fannon, J. E., Shull, J. M., and BeMiller, J. N. (1993). Interior channels of starch granules. **Cereal Chemistry**. 70: 611-613.
- Fannon, J. F., Hauber, R. J., and BeMiller, J. N. (1992). Surface pores of starch granules. **Cereal Chemistry**. 69: 284-288.
- Fennema, O. R. (1985). Water and ice. In O. R. Fennema (ed.). **Food Chemistry** (2nd ed., pp 23-67). Marcel Dekker: New York.
- Forssell, P., Myllarinen, P., Heinamaki, J., Palvainen, P., Yliruusi, J., and Poutanen, K. (1999). Coated starch capsules and a process of producing them. WO Patent 9952512A1.
- Fouache, C., Duflo, P., and Looten, P. (2003). Branched maltodextrins and method of preparing them. US Patent 6630586.
- Franco, C. M. L., Cabral, A. F. R., and Tavares, D. Q. (2002). Structural and physicochemical characteristics of lintnerized native and sour cassava starches. **Starch/Stärke**. 54: 469-475.
- French, D. (1984). Organization of starch granules. In R. L. Whistler, J. N. BeMiller, and E. F. Paschall (eds.). **Starch chemistry and technology** (pp 183-247). Florida: USA.
- Gallant, D. J., Bouchet, B., and Baldwin, P. M. (1997). Microscopy of starch: evidence of a new level of granule organization. **Carbohydrate Polymers**. 32: 177-191.
- Gallant, D., Mercier, C., and Guilbot, A. (1972). Electron microscopy of starch granules modified by bacterial alpha-amylase. **Cereal Chemistry**. 49: 354-365.

- Griffin, G. J. L. (1989). **Transport processes and unit operations**. (3rd ed.). New Jersey: Prentice Hall PTR. 651 pp.
- Helbert, W., Schüle, M., and Henrissat, B. (1996). Electron microscopic investigation of the diffusion of *Bacillus licheniformis* α -amylase into maize starch granules. **International Journal of Biological Macromolecules**. 19: 165-169.
- Hellman, N. N., and Melvin, E. H. (1950). Surface area of starch and its role in water sorption. **Journal of the American Chemical Society**. 72: 5186-5188.
- Hizukuri, S. (1986). Polymodal distribution of the chain lengths of amylopectin, and its significance. **Carbohydrate Research**. 147: 342-347.
- Hoover, R., and Vasanathan, T. (1994). The effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of cereal, legume and tuber starches. **Carbohydrate Research**. 252: 33-53.
- Hoover, R., Swamidas, G., and Vasanathan, T. (1993). Studies on the physicochemical properties of native, defatted and heat moisture treated pigeon pea (*Cajanus Cajan* L.) starch. **Carbohydrate Research**. 246: 185-203.
- Hoseney, R. C., and Lineback, D. R. (1996). Methods of synthesis and characterization. In **AACC short course on starch: Structure properties and food uses**. Bangkok: Thailand
- Huang, Z. Q., Xie, X. L., Chen, Y., Lu, J. P., and Tong, Z. F. (2008). Ball-milling treatment effect on physicochemical properties and features for cassava and maize starches. **Comptes Rendus Chimie**. 11(1-2): 73-79.
- Huber, K. C., and BeMiller, J. N. (1997). Visualisation of channels and cavities of corn and sorghum starch granules. **Cereal Chemistry**. 74: 537-541.
- Huber, K. C., and BeMiller, J. N. (2000). Channels of maize and sorghum starch granules. **Carbohydrate Polymers**. 41: 269-276.
- Inouchi, N., Glover, D. V., and Fuwa, H. (1987). Properties of residual maize starches following acid hydrolysis. **Starch/Stärke**. 39: 284-288.
- Jane, J., Shen, L., Wang, L., and Maningat, C. C. (1992). Preparation and properties of small-particle corn starch. **Cereal Chemistry**. 69: 280-283.

- Jane, J., Wong, K. S., and McPherson, A. E. (1997). Branch structure difference in starches of A and B type X-ray patterns revealed by their Naegeli dextrans. **Carbohydrate Research**. 300: 219-227.
- Jayakody, L., and Hoover, R. (2002). The effect of lintnerization on cereal starch granules. **Food Research International**. 35: 665-680.
- Juszczak, L., Fortuna, T., and Wodnicka, K. (2002). Characteristics of cereal starch granules surface using nitrogen adsorption. **Journal of Food Engineering**. 54(2): 103-110.
- Kadokawa, J. I. (2013). Architecture of amylose supramolecules in form of inclusion complexes by phosphorylase-catalyzed enzymatic polymerization. **Biomolecules**. 3(3): 369-385.
- Kainuma, K., and French, D. (1971). Nageli amylopectin and its relationship to starch granule structure. I. Preparation and properties of amylopectins from various starch types. **Biopolymer**. 101: 1673-1680.
- Kamila, J., Janusz, K., Renata, B., and Katarzyna, S. (2011). New starch preparations resistant to enzymatic digestion. **Journal of the Science of Food and Agriculture**. 92: 886-891.
- Karathanos, V. T., and Saravacos, G. D. (1993). Porosity and pore size distribution of starch materials. **Journal of Food Engineering**. 18: 259-280.
- Katarzyna, S., Janusz, K., Renata, B., and Kamila, J. (2012). Resistant dextrans as prebiotic. **INTECH Open**. 261-288.
- Kim, H. S., and Huber, K. C. (2008). Channels within soft wheat starch A-and B-type granules. **Journal of Cereal Science**. 48: 159-172.
- Klobes, P., Meyer, K., and Munro, R. G. (2006). Porosity and specific surface area measurements for solid materials. **NIST Recommended Practice Guide**.
- Kobayashi, S., Miwa S., and Suzuki, W. (1992). Method of preparing modifies starch granules. European Patent 0539910A1.
- Kwon, S. K., Chung, K. M., Shin, S. I., and Moon, T. W. (2005). Contents of indigestible fraction, water solubility, and color of pyrodextrans made from waxy sorghum starch. **Cereal Chemistry**. 82: 101-104.
- Langmuir, I. (1916). "Part I". The Research Laboratory of The General Electric Company: 2221.
- Laurentin, A., Cardenas, M., Ruales, J., Perez, E., and Tovar, J. (2003). Preparation of indigestible pyrodextrans from different starch sources. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 51(18): 5510-5515.

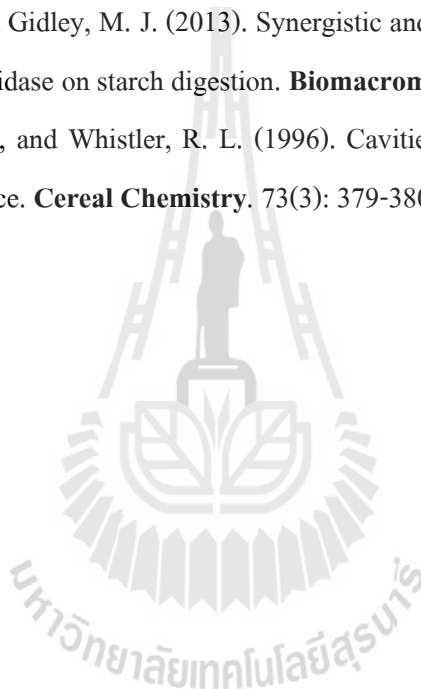
- Le Corre, D., Bras, J., and Dufresne, A. (2010). Starch nanoparticles: A review **Biomacromolecules**. 11: 1139-1153.
- Le Corre, D., Bras, J., and Dufresne, A. (2011). Evidence of Micro and Nanoscaled particles during starch nanocrystals preparation and their isolation. **Biomacromolecules**. 12: 3039-3046.
- Lefranc, M. (2006). Effects of a soluble fiber with excellent tolerance, NUTRIOSE FB06, on the gut ecosystem: A review. In **Dietary fibre** (pp 12-14). Helsinki: Finland.
- Li, W. D., Corke, H., and Beta, T. (2007). Kinetics of hydrolysis and changes in amylose content during preparation of microcrystalline starch from high amylose maize starches. **Carbohydrate Polymers**. 69: 398-405.
- Lim, S., Jane, J., Rajagopalan, S., and Seilb, P.A. (1992). Effect of starch granule size on physical properties of starch-filled polyethylene film. **Biotechnology Progress**. 8: 51-57.
- Lintner, C. J. (1886). Studien uber diastase. **Journal Fur Praktische Chemie-practical Applications and Applied Chemistry**. 34: 378-386.
- MacGregor, A. W., and Balance, D. L. (1980). Hydrolysis of large and small starch granules from normal and waxy barley cultivars by alpha-amylases from barley malt. **Cereal Chemistry**. 57: 397-402.
- Mana, K. K. (2003). Enzyme resistant dextrins from high amylose corn mutant starches. **Starch/Stärke**. 53: 21-26.
- Mc Clain, J. A. (2009). United State Patent. Method of producing resistant starch, US patent 605, 254 B2.
- Mkumbira, J. (2002). **Cassava development for small scale farmers: approaches to breeding in Malawi**. PH.D. Dissertation, Swedish University of Agricultural Sciences. Uppsala, Sweden.
- Monika, S., and Jerzy, J. (2010). Characteristics of pores in native starch granules. **Starch/Stärke**. 62: 229-235
- Myllarinen, P., Forssell, P., von Wright, A., Alader, M., Mattila-Sandhol, T., and Poutanen, K. (1999). Starch capsules containing microorganisms and/or polypeptides or proteins and process of producing them. WO 9952511A1.
- Nageli, W. (1874). Liebigs Annalen der Chemie. 173: 218.

- Nassar, N. M. A. (1986). Genetic variation of wild *Manihot* species native to Brazil and its potential for cassava improvement. **Field Crops Research**. 13: 177-184.
- Nassar, N. M. A. (2005). Cassava: Some ecological and physiological aspects related to plant breeding [On-line]. Available: <http://www.geneconserve.pro.br/>.
- Nassar, N. M. A., and Costa, C. P. (1976). Tuber formation and protein content in some wild cassava (*mandioca*) species native to central Brazil. **Experientia**. 33: 1304-1306.
- Niemann, C., and Whistler, R. L. (1992). Effect of acid hydrolysis and ball milling on porous corn starch. **Starch/Starke**. 44: 409-414.
- Oates, C. G. (1997). Towards an understanding of starch granule structure and hydrolysis. **Trends Food Science Technology**. 8: 375-382.
- Ohkuma, K., Matsuda, I., Katta, Y., and Hanno, Y. (1999). Pyrolysis of starch and its digestibility by enzymes-characterization of indigestible dextrin. **Journal of the Japanese Society of Starch Science**. 37: 107-114.
- Ohkuma, K., Yoshio, H., Kazuyuki, I., Isao, M., and Yasuo, K., Indigestible dextrins. (1994). US Patent 5364652.
- Onwueme, I. C. (1978). **The tropical tuber crops: yams, cassava, sweetpotato, cocoyams**. John Wiley and Sons Ltd. 234.
- Parker, R., and Ring, S. G. (2001). Aspects of the physical chemistry of starch, **Journal of Cereal Science**. 34: 1-17.
- Planchot V., Colonna P., Gallant D. J., and Bouchet B. (1995). Extensive degradation of native starch granules by α -amylase from *Aspergillus fumigatus*. **Journal of Cereal Science**. 21: 163-171.
- Planchot, V., Colonna, P., and Buléon, A. (1997). Enzymatic hydrolysis of α -glucan crystallites. **Carbohydrate Research**. 298: 319-326.
- Popplewell, L. M., and Peleg, M. (1989). Theoretical comparison of two segregation indices for binary powder mixtures. **Powder Technology**. 58: 55.
- Purseglove, J. W. (1968). **Tropical crops. Dicotyledons I**. Longmans: London. 332.
- Rahman, M. S. (2001). Toward prediction of porosity in food during drying: a brief review. **Drying Technology: An International Journal**. 19(1): 1-13.

- Robin, J. P., Mercier, C., Duprat, F., and Guilbot, A. (1975). Lintnerized starches. Chromatographic and enzymatic studies of insoluble residues from acid hydrolysis of various cereal starches, particularly waxy maize starch. **Starch/Stärke**. 27: 36-45.
- Robyt, J. F., Choe, J., Hahn, R. S., and Fuchs, E. B. (1996). Acid modification of starch granules in alcohols: effects of temperature, acid concentration, and starch concentration. **Carbohydrate Research**. 281: 203-218.
- Rocha, T. S., Carneiro, A. P. A., and Franco, C. M. L. (2010). Effect of enzymatic hydrolysis on some physicochemical properties of root and tuber granular starches. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**. 30(2): 544-55.
- Rogers, D. J., and Appan, S. G. (1973). **Manihot and manihotoides (Euphorbiaceae): a computer assisted study**. Organisation for Flora Neotropica. Monograph 13. Hafner press: New York. 278 pp.
- Rouquerol, J., Avnir, D., Fairbridge, D. C. W., Everett, D. H., Haynes, J. H., Pernicone, N., Ramsay, J. D. F., Sing, K. S. W., and Unger, K. K. (1994). Recommendations for the characterization of porous solids (Technical Report). **Pure and Applied Chemistry**. 66: 1739-1758.
- Sanguanpong, V., Chotineerarat, S., Piyachomkwan, K., Oates, C. G., Chinachoti, P., and Sriroth K. (2002). Hydration and physico-chemical properties of small-particle cassava starch. **Journal of the Science of Food and Agriculture**. 83: 123-132.
- Schoch, T. J. (1964). Swelling power and solubility of granular starches. In R. Whistler, R. Smith, and J. BeMiller (eds.). **Methods in carbohydrate chemistry** (pp 106-108). Academic Press.
- Shenghua, H., Yibing, Q., Elfalleh, W., Lin, L., Jie, C., and Ying, M. (2014). Effect of ball milling on the physicochemical properties of maize starch. **Biotechnology**. 3: 54-59.
- Shinji, T., Makoto, H., Katsunori, T., Takuo, A., and Tetsuya, T. (1998). Structural change of maize starch granules by ball-mill treatment. **Starch/Stärke**. 8: 342-348.
- Sing K. S. (1985). Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity. **Pure and Applied Chemistry**. 57(4): 603-619
- Sujka, M., and Jamroz, J. (2006). Starch granule porosity and its changes by means of amylolysis. **International Agrophysics**. 21: 107-113.

- Tamaki, S., Teranishi, K., Hisamatsu, M., and Yamada, T. (1997). Innerstructure of potato starch granules. **Starch/Stärke**. 49: 387-390.
- Thomas, D. J., and Atwell, W. A. (1999). **Starches: Practical guides for the food industry**. Eagan Press, St Paul: Minnesota. 94 pp.
- Tomasik, P., Palasinski, M., and Wiejak, S. (1989). The thermal decomposition of carbohydrates. Part II. The decomposition of starch. **Advances in Carbohydrate Chemistry and Biochemistry**. 47: 270-335
- Uthumporn, U., Zaidul, I. S. M., and Karim, A. A. (2010). Hydrolysis of granular starch at sub-gelatinization temperature using a mixture of amylolytic enzymes. **Food and Bioproducts Processing**. 88: 47-54.
- Valetudie, J. C., Colonna, P., Bouchet, B., and Gallant, D. J. (1993). Hydrolysis of tropical tuber starches by bacterial and pancreatic alpha-amylases. **Starch/Stärke**. 45: 270-276.
- Vasanthan, T., and Bhatti, R. S. (1996). Physicochemical properties of small and large granule starches of waxy, regular and high amylose barleys. **Cereal Chemistry**. 73: 199-207.
- Vermeylen, R., Goderis, B., Reynaers, H., and Delcour, J. A. (2004). Amylopectin molecular structure reflected in macromolecular organization of granular starch. **Biomacromolecules**. 5: 1775-1786.
- Vermorel, M., Coudray, C., Wils, D., Sinaud, S., Tressol, J. C., and Montaurier, C., (2004). Energy value of a low-digestible carbohydrate, NUTRIOSE® FB, and its impact on magnesium, calcium and zinc apparent absorption and retention in healthy young men. **European Journal of Nutrition**. 43: 344-352.
- Wang, L. F., and Wang, Y. J. (2001). Structures, physicochemical properties of acid-thinned corn, potato and rice starches. **Starch/Stärke**. 53: 570-576.
- Wang, S. J., and Copeland, L. (2014). Effect of acid hydrolysis on starch structure and functionality: A review. **Food Science and Nutrition**. 55(8): 1081-1097.
- Wang, S. J., Blazek, J., Gilbert, E. P., and Copeland, L. (2012). New insights on the mechanism acid degradation of pea starch. **Carbohydrate Polymers**. 87: 1941-1949.
- Wang, S. J., Sharp, P., and Copeland, L. (2011). Structural and functional properties of starches from field peas. **Food Chemistry**. 126: 1546-1552.
- Wang, Y. J., Kozlowski, R., and Delgado, G. A. (2001). Enzyme resistant dextrins from high amylose corn mutant starches. **Starch/Stärke**. 53: 21-26.

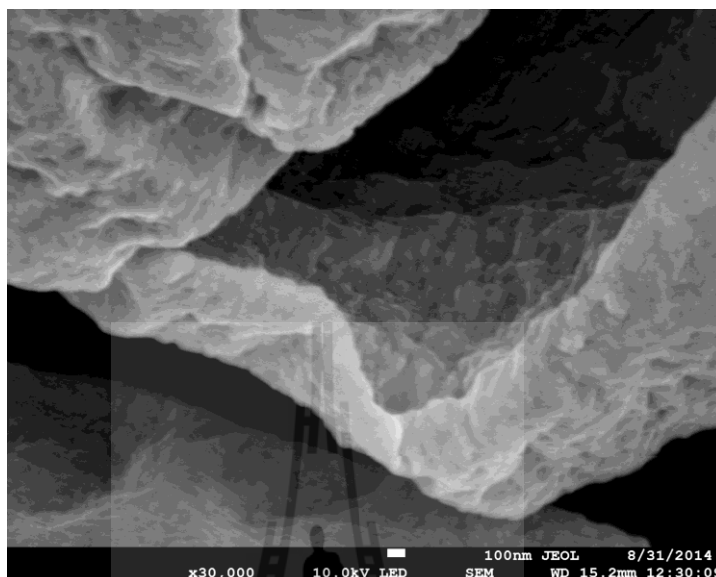
- Wurzburg, O. B. (1995). In Food polysaccharides and their applications. **Modified Starches**. 67-77.
- Yanjie, B., Cai, L., Douth, J., Gilbert, E. P., and Shi, Y. C. (2014). Structural changes from native waxy maize starch granules to cold water-soluble pyrodextrin during thermal treatment. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 62: 4186-4194.
- Zeller, B. L., Saleeb, F. Z., and Ludescher, R. D. (1999). Trends in development of porous carbohydrate food ingredients for use in flavor encapsulation. **Trends in Food Science and Technology**. 9: 389-394.
- Zhang, B., Dhital, S., and Gidley, M. J. (2013). Synergistic and antagonistic effects of α -amylase and amyloglucosidase on starch digestion. **Biomacromolecules**. 14: 1945-1954.
- Zhao, J., Madson, M. A., and Whistler, R. L. (1996). Cavities in porous corn starch provide a large storage space. **Cereal Chemistry**. 73(3): 379-380.



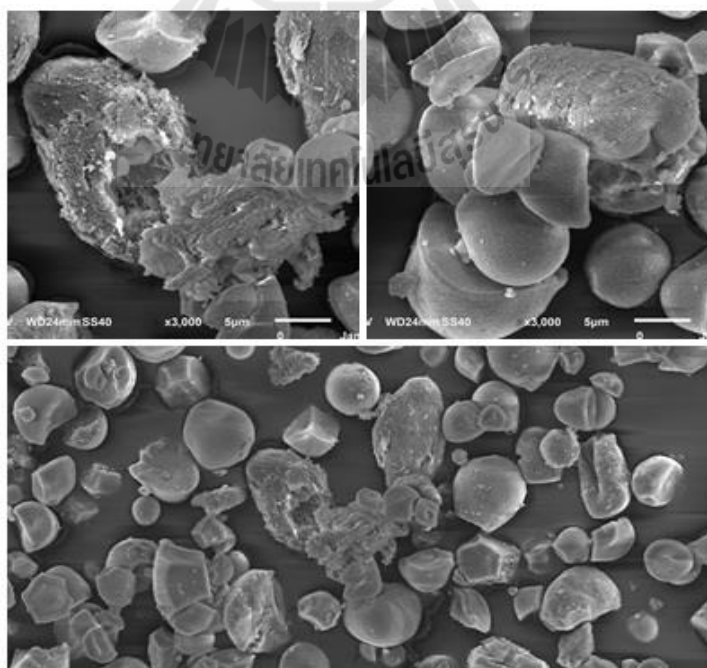


ภาคผนวก

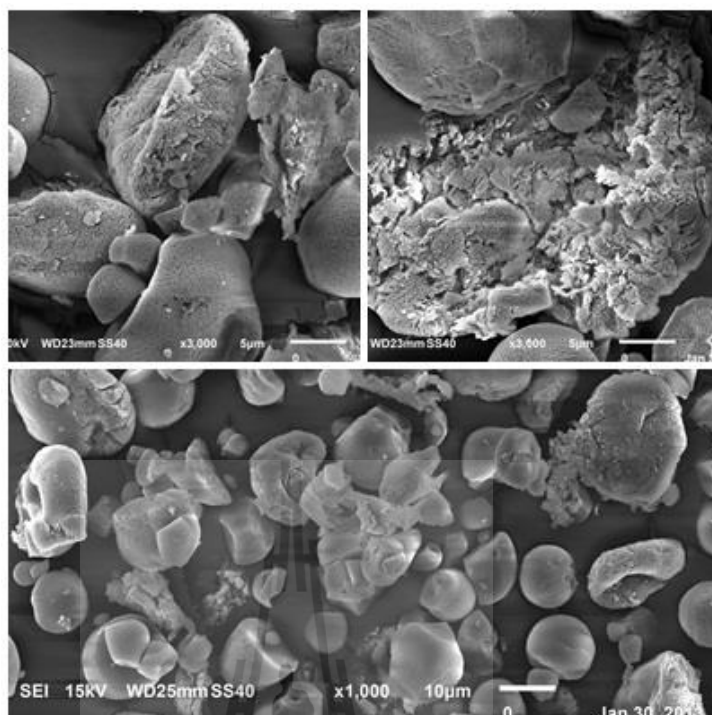
ภาคผนวก



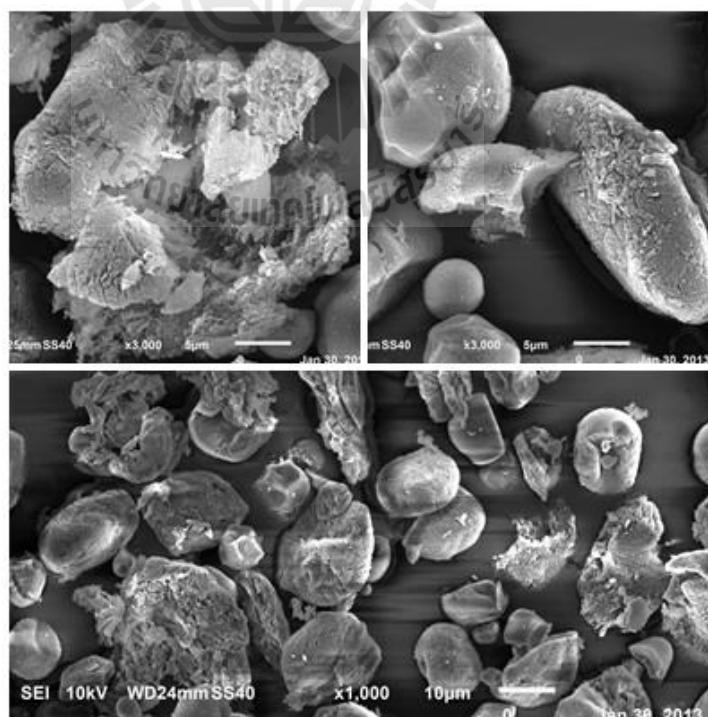
ภาพที่ ก.1 รูเดี่ยวขนาดใหญ่ นั้น ภายในมีความขรุขระ และรูที่เกิดขึ้นขยายลงไปสู่ส่วนกลางของ เม็ดสตาร์ชที่เกิดจากการย่อยด้วยเอนไซม์ผสม



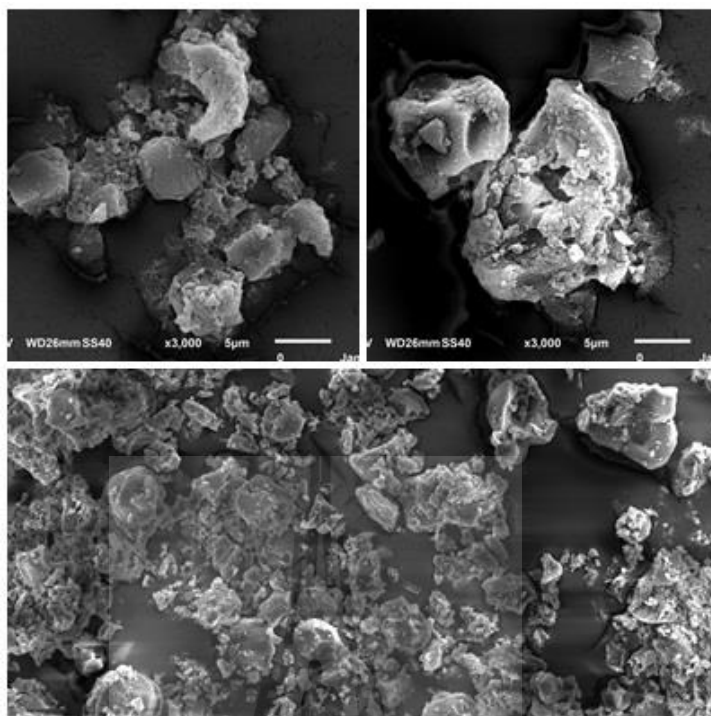
ภาพที่ ก.2 สตาร์ชมันสำปะหลังดิบบดด้วย ball-mill เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



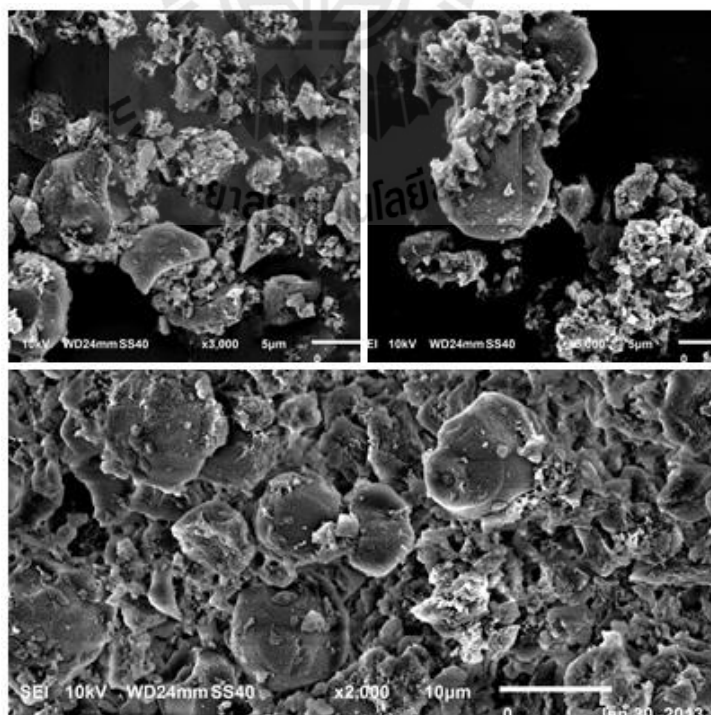
ภาพที่ ก.3 สตาร์ไขมันสำปะหลังดิบบดด้วย ball-mill เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



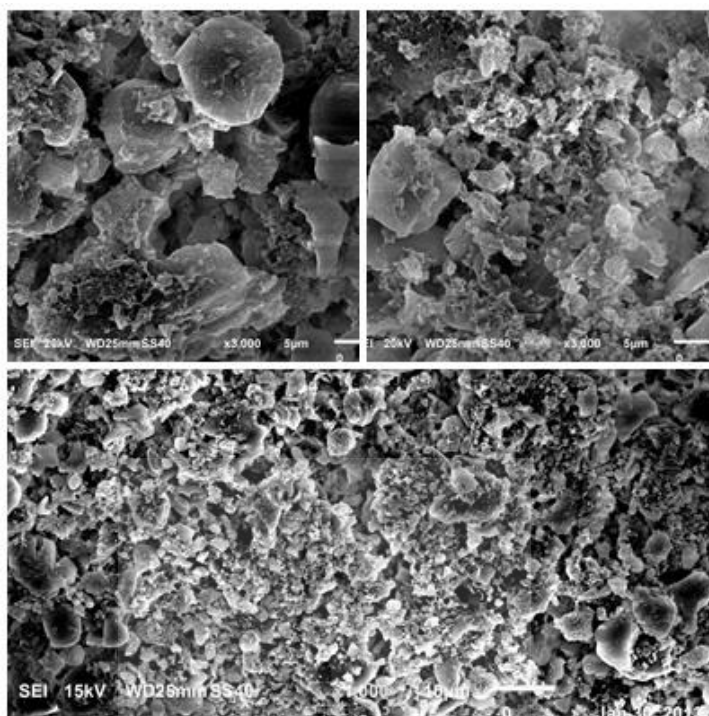
ภาพที่ ก.4 สตาร์ไขมันสำปะหลังดิบบดด้วย ball-mill เป็นเวลา 3 ชั่วโมง



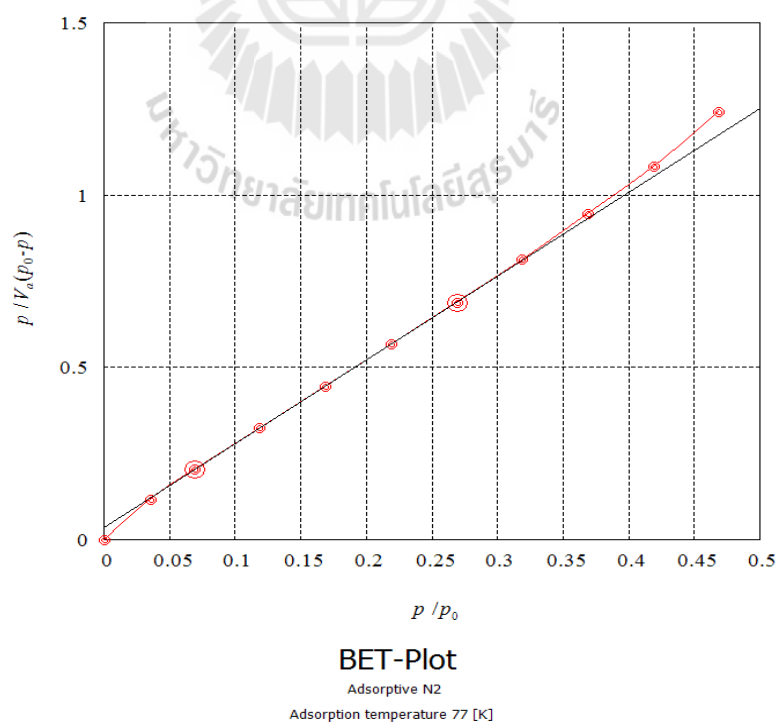
ภาพที่ ก.5 สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball-mill เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



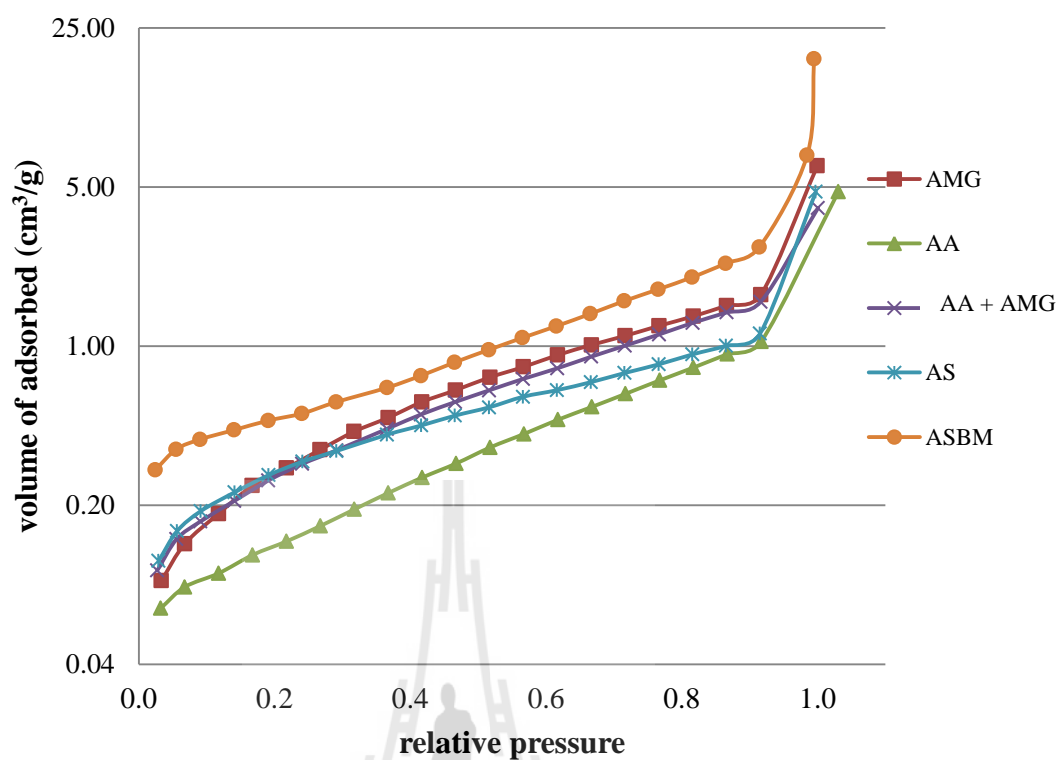
ภาพที่ ก.6 สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball-mill เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



ภาพที่ ก.7 สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball-mill เป็นเวลา 3 ชั่วโมง



ภาพที่ ก.8 ตัวอย่างกราฟ BET สำหรับคำนวณพื้นที่ผิวจำเพาะ



ภาพที่ ก.9 ไอโซทอมการดูดซับไนโตรเจนของสตาร์ชที่ข่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส (AA); สตาร์ชที่ข่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG); สตาร์ชที่ข่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสร่วมกับเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส (AA + AMG); สตาร์ชที่ข่อยด้วยกรด (AS); และสตาร์ชที่ข่อยด้วยกรดแล้วบดต่อด้วย ball-mill (ASBM)

ประวัติผู้เขียน

นางสาวเกวลี พร้อมิพัฒน์พร เกิดเมื่อวันที่ 8 เมษายน พ.ศ. 2530 ที่อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียน มัธยมสังคีตวิทยา กรุงเทพมหานคร ในปี พ.ศ. 2548 จากนั้นเข้ารับการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และสำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ. 2552 ภายหลังสำเร็จการศึกษาได้เข้าทำงานในตำแหน่งผู้ช่วยนักวิจัย สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีจนถึงปี พ.ศ. 2553 ได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปัจจุบันทำงานอยู่ที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ฝ่ายวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ งานวิเคราะห์น้ำ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ตำแหน่งนักวิทยาศาสตร์

ผลงานทางวิชาการ

Promptiputtanapon, K. and Tongta, S. 2015. Modification of tapioca starch granule surfaces on soluble fiber formation. **Journal of Food Science and Agricultural Technology**. 1(1): 116-121.